



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**ANALISIS TERMAL TERHADAP KABEL BAWAH TANAH  
PADA SALURAN DISTRIBUSI 20 KV MENGGUNAKAN  
*FINITE ELEMENT METHOD* UNTUK MENGETAHUI  
PENGARUH KONDISI TERMAL TERHADAP *AMPACITY*  
KABEL**

Yosua Pandapotan Sijabat  
NRP 2211100199

Dosen Pembimbing  
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.  
Danar Fahmi, S.T., M.T.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TE 141599**

**THERMAL ANALYSIS RELATING TO CABLE AMPACITY  
ON 20 KV UNDERGROUND DISTRIBUTION CABLE  
USING FINITE ELEMENT METHOD**

Yosua Pandapotan Sijabat  
NRP 221110199

Advisor  
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.  
Danar Fahmi, S.T., M.T

**ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT**  
Faculty of Industrial Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017

## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “Analisis Termal Terhadap Kabel Bawah Tanah pada Saluran Distribusi 20 kV Menggunakan *Finite Element Method* untuk Mengetahui Pengaruh Kondisi Termal terhadap *Ampacity* Kabel” adalah benar-benar hasil karya mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2017

Yosua Pandapotan  
NRP 2211 100 199

**ANALISIS THERMAL TERHADAP KABEL BAWAH  
TANAH PADA SALURAN DISTRIBUSI 20 KV  
MENGUNAKAN *FINITE ELEMENT METHOD*  
UNTUK MENGETAHUI PENGARUH KONDISI  
THERMAL TERHADAP *AMPACITY* KABEL**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sabagian Persyaratan Untuk  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Elektronika  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopemeber**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I,**

**Dosen Pembimbing II,**

**Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.**

**Nip: 197007121998021001**

**Danlar Fahmi, ST., MT.**

**Nip: 198909252014041002**

**SURABAYA  
JANUARI, 2017**



**Analisis Termal Terhadap Kabel Bawah Tanah pada Saluran  
Distribusi 20 kV Menggunakan *Finite Element Method* untuk  
Mengetahui Pengaruh Kondisi Termal terhadap *Ampacity*  
Kabel**

**Nama : Yosua Pandapotan Sijabat**

**Pembimbing I : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.**

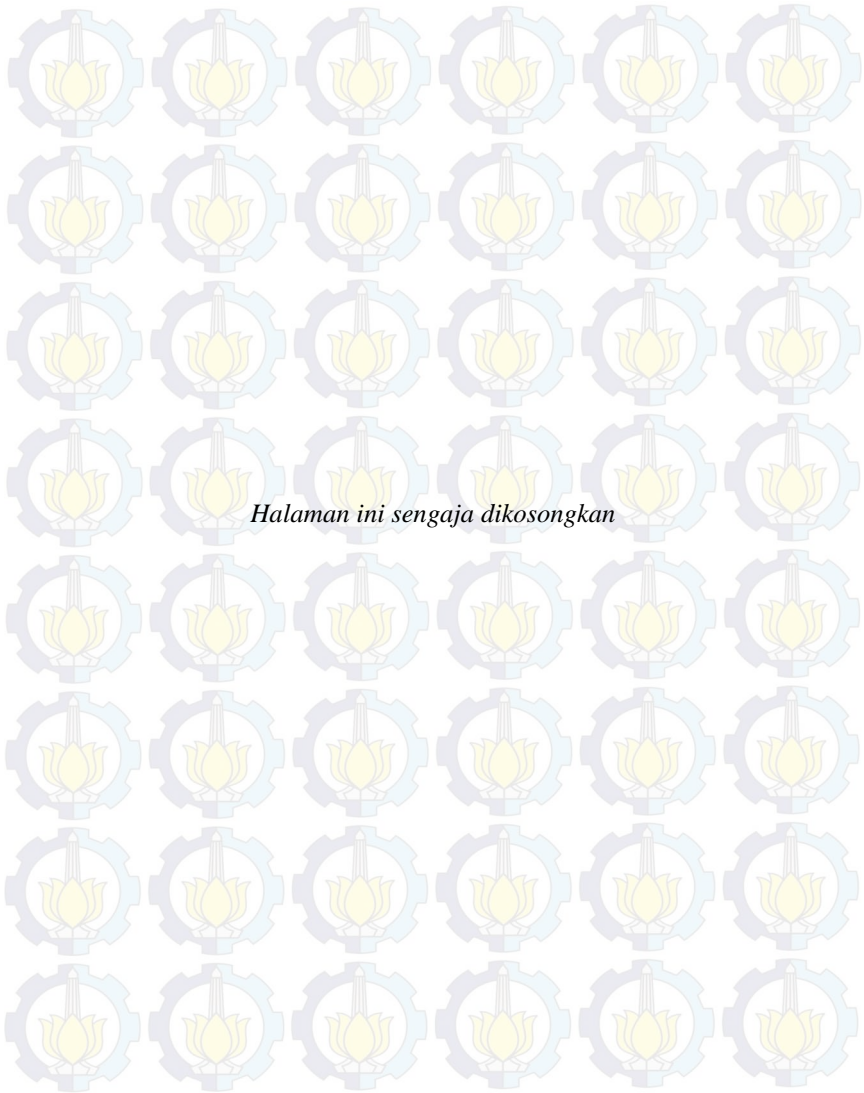
**Pembimbing II : Daniar Fahmi, ST., M.T.**

**ABSTRAK**

Pada daerah padat penduduk distribusi listrik pemasangan distribusi saluran udara terkadang menemui beberapa kendala, salah satunya adalah ruang untuk pemasangan tiang distribusi. Untuk mengatasi masalah tersebut maka dilakukanlah pemasangan sistem distribusi bawah tanah. Kabel bawah tanah yang biasa digunakan adalah kabel dengan isolasi XLPE. Pemasangan kabel bawah tanah juga memiliki beberapa masalah, yaitu temperatur pada kabel bawah tanah yang bisa mempengaruhi kemampuan hantaran arus atau *ampacity* pada kabel. Disipasi panas yang kurang baik pada lingkungan penanaman kabel dapat berpengaruh terhadap kemampuan hantaran arus pada kabel.

Pada studi ini, akan dilakukan analisis persebaran panas pada kabel dan daerah disekitarnya. Pemasangan kabel bawah tanah dibagi menjadi beberapa jenis, yaitu pemasangan berjajar, trefoil, serta pemasangan berjajar dan trefoil dengan menggunakan *duct*. Analisis persebaran panas pada kabel dan tanah disekitarnya dilakukan dengan menggunakan simulasi berbasis FEM (*Finite Element Method*). Data hasil persebaran panas akan digunakan untuk melakukan perhitungan manual terhadap kemampuan hantaran arus pada kabel. Hasil perhitungan akan dibandingkan, antara pemasangan trefoil dan berjajar, pada saat menggunakan *duct* dan saat tidak menggunakan *duct*.

**Kata Kunci : Kabel Bawah Tanah, XLPE, Susunan Trefoil dan Berjajar, Kemampuan Hantaran Arus**



# **Thermal Analysis Relating to Cable Ampacity on 20 kV Underground Distribution Cable using Finite Element Method**

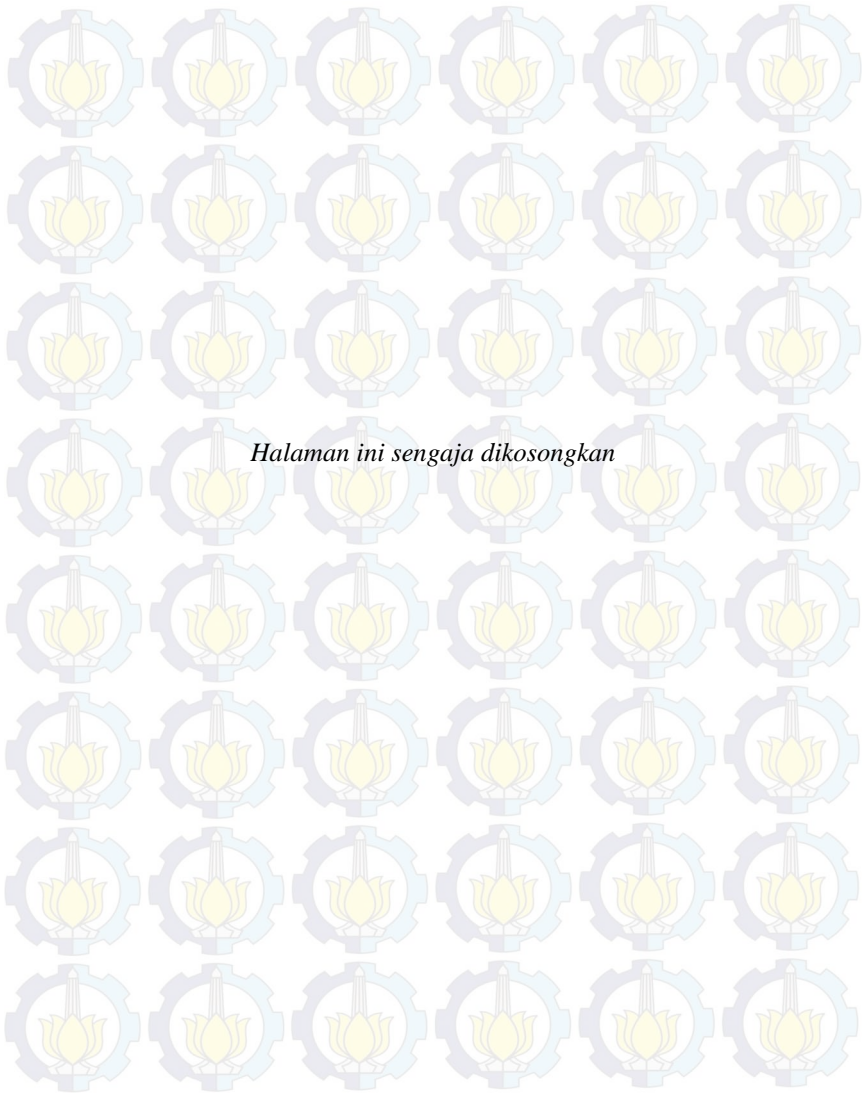
**Name** : Yosua Pandapotan Sijabat  
**1<sup>st</sup> Advisor** : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.  
**2<sup>nd</sup> Advisor** : Daniar Fahmi, ST., M.T.

## **ABSTRACT**

*In densely populated areas it is usually hard to distribute electricity through overhead cable systems, one of the problem is to find a space to erect the tower. To solve the problem the underground cable systems is assembled. The cable that usually used for the underground systems is XLPE insulated cable. The underground cable systems are also has some problems too, as the temperature on the underground cable could affect the cable ampacity. Bad dissipation of the heat generated in the burial environment could affect the ampacity too.*

*This study will analyze heat distribution on the cable and its environment. There are some burial configurations on the underground cable systems i.e. flat formations and trefoil formations on direct burial and the burial using a duct. Heat distribution analysis will be done using Finite Element Method based simulation. The heat distribution data will be used to manually calculate the cable ampacity.*

**Key Words:** *Underground Cable, XLPE, Trefoil and Flat Formations, Ampacity*





## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan YME karena berkat dan rahmat-Nya penulis akhirnya bisa menyelesaikan tugas akhir ini dalam waktu yang tepat, meskipun tidak tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak I Made Yulistya Negara dan Bapak Daniar Fahmi, atas segala pengetahuannya dan waktunya dalam membimbing penulis sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Bapak Saudin Sijabat, Ibu Rosnani Silalahi(†), Ferdinand Novando, dan Irene Margaretha selaku papa, mama, abang, dan kakak penulis yang selalu memberikan nasehat, semangat, dan doa kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
3. Mas Jentrung, Mas Afif, dan Grignon Kevin yang telah memberikan inspirasi bagi penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Teman-teman Angkatan 2011 ELVN yang membantu penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir.
5. Teman-teman WP, Mamet, Yono, Aldo, Alay, BHS, Sarmedi, Dyal, Pendjokz, Gilang, Bogang, Gungde, Toshi, Irwin, Kharis, Om, Lukman, Sulip, Anjik, Radut, Roy, Satria, Vigor, Yanu, dan Pohon yang telah menemani penulis selama masa perkuliahan dan memotivasi penulis agar dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Ekal, Sondang, Radut dan Anto yang telah membantu penulis bertahan di Surabaya pada awal perkuliahan walaupun akhirnya meninggalkan Surabaya lebih dulu.
7. Teman-teman Laboratorium Tegangan Tinggi yang mendukung penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
8. Adik-adik E-52, E-53, E-54, E-55, serta penghuni kontrakan Bhaskara, Thesar, Erik, Lamek, Dithyo, dan Pacil yang selalu bisa menghangatkan suasana.
9. Penghuni Kosan 3C, Sani, Paulus, Evandro, Dikson, Marampa, Beny, Mas Roket, Mas Fandi, Mas Galih, Mas Bento.
10. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Jurusan Teknik Elektro-FTI, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis khususnya dan juga bagi para pembaca pada umumnya.

Surabaya, Desember 2016

**Penulis**

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK .....	i
ABSTRACT .....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL .....	xv
 BAB 1 PENDAHULUAN.....	 1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Sistematika Penulisan.....	2
 BAB 2 KABEL DAN LEMAMPUAN HANTARAN ARUS.....	 5
2.1 Kabel pada Sistem Tenaga.....	5
2.1.1 Konduktor dengan Isolasi Udara .....	5
2.1.2 Isolatosi untuk Menghemat Ruang .....	6
2.1.3 Isolatosi untuk Tegangan Lebih Besar.....	8
2.1.3.1 Bahan Pelindung Isolasi .....	9
2.1.3.2 Lapisan Pelindung Konduktor.....	10
2.1.3.3 Persyaratan Lapisan Pelindung Isolasi .....	10
2.1.3.4 Persyaratan Lapisan Isolasi .....	11
2.1.3.5 Lapisan Pembungkus Kabel .....	11
2.1.4 Kabel pada Tegangan Menengah.....	11
2.1.4.1 N2XSY/NA2XSY .....	12
2.1.4.2 N2XSEY/NA2XSEY .....	13
2.1.4.3 N2XSEFGbY/NA2XSEFGbY .....	14
2.1.4.4 N2XSEBY/NA2XSEBY .....	16
2.2 Kemampuan Hantaran Arus pada Kabel.....	17
2.2.1 Resistivitas Termal pada Tanah.....	18
2.2.2 Perhitungan Kemampuan Hantaran Arus pada Kabel .....	18

## BAB 3 METODE DAN SIMULASI KABEL BAWAH

TANAH .....	21
3.1 Metode Element Hingga (FEM) .....	21
3.2 Dasar Perhitungan Finite Element Method .....	21
3.2.1 Proses Diskritisasi .....	21
3.2.2 Menentukan Interpolasi atau Fungsi yang Digunakan ...	22
3.2.3 Memformulasikan Persamaan Elemen .....	22
3.2.4 Menyusun Persamaan Elemen dalam Suatu Persamaan Sistem .....	23
3.2.5 Menyelesaikan Persamaan Sistem .....	23
3.3 Perhitungan Elemen Linier Satu Dimensi .....	23
3.4 Perhitungan Elemen Segitiga Dua Dimensi Linier .....	25
3.5 Kontruksi dan Spesifikasi Kabel Bawah Tanah .....	28
3.6 Material Penyusun Kabel .....	29
3.7 Pemodelan Kabel .....	30
3.8 Pemodelan Pemasangan Kabel Bawah Tanah .....	34
3.8.1 Pemasangan Berjajar .....	34
3.8.2 Pemasangan <i>Trefoil</i> .....	35
3.8.3 Pemasangan Berjajar dengan <i>Duct</i> .....	36
3.8.4 Pemasangan <i>Trefoil</i> dengan <i>Duct</i> .....	37

## BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA .....

4.1 Tegangan, Arus dan <i>Volume Heat</i> pada Kabel .....	39
4.2 Perbandingan Temperatur pada Pemasangan Kabel Berjajar dan <i>Trefoil</i> .....	40
4.2.1 Hasil Simulasi pada Pemasangan Berjajar .....	40
4.2.1.1 Temperatur pada Kabel .....	41
4.2.1.2 Temperatur Antar Kabel .....	43
4.2.1.3 Persebaran Panas Secara Horizontal .....	44
4.2.2 Hasil Simulasi pada Pemasangan <i>Trefoil</i> .....	45
4.2.2.1 Temperatur pada Kabel .....	47
4.2.2.2 Temperatur Diantara Konduktor .....	49
4.2.2.3 Persebaran Panas Secara Horizontal .....	50



4.2.3	Perbandingan Pemasangan Berjajar dan <i>Trefoil</i> .....	51
4.2.3.1	Perbandingan Temperatur Konduktor .....	51
4.2.3.2	Perbandingan <i>Ampacity</i> Kabel .....	52
4.3	Perbandingan Temperatur pada Pemasangan Kabel Berjajar dengan <i>Duct</i> dan Berjajar Tanpa <i>Duct</i> .....	54
4.3.1	Hasil Simulasi pada Pemasangan Berjajar dengan <i>Duct</i> .....	54
4.3.1.1	Temperatur pada Kabel .....	56
4.3.1.2	Temperatur Didalam <i>Duct</i> .....	57
4.3.1.3	Persebaran Panas Secara Horizontal .....	57
4.3.2	Perbandingan Pemasangan Berjajar dengan <i>Duct</i> dan Berjajar Tanpa <i>Duct</i> .....	58
4.3.2.1	Perbandingan Temperatur Konduktor .....	59
4.3.2.2	Perbandingan <i>Ampacity</i> Kabel .....	59
4.4	Perbandingan Temperatur pada Pemasangan Kabel <i>Trefoil</i> tanpa <i>Duct</i> dan <i>Trefoil</i> dengan <i>Duct</i> .....	61
4.4.1	Hasil Simulasi pada Pemasangan <i>Trefoil</i> dengan <i>Duct</i> .....	61
4.4.1.1	Temperatur pada Kabel .....	64
4.4.1.2	Temperatur Didalam <i>Duct</i> .....	64
4.4.1.3	Persebaran Panas Secara Horizontal .....	66
4.4.1.4	Temperatur Diantara <i>Duct</i> .....	66
4.4.2	Perbandingan Hasil Simulasi Pemasangan <i>Trefoil</i> dengan <i>Duct</i> dan <i>Trefoil</i> Tanpa <i>Duct</i> .....	67
4.4.2.1	Perbandingan Temperatur Konduktor .....	68
4.4.2.2	Perbandingan <i>Ampacity</i> Kabel .....	68
4.5	Perbandingan Temperatur pada Pemasangan Kabel Berjajar Kondisi Kering dan Berjajar kondisi Basah .....	70
4.5.1	Hasil Simulasi pada Pemasangan Berjajar dengan Kondisi Basah .....	70
4.5.1.1	Temperatur pada Kabel .....	71
4.5.1.2	Temperatur Antar Kabel .....	72
4.5.1.3	Persebaran Panas Secara Horizontal .....	73

4.5.2 Perbandingan Hasil Simulasi Pemasangan Berjajar Kondisi Kering dan Berjajar Kondisi Basah.....	74
4.5.2.1 Perbandingan Temperatur Konduktor .....	74
4.5.2.2 Perbandingan <i>Ampacity</i> Kabel .....	75
4.6 Perbandingan Temperatur pada Pemasangan Kabel <i>Trefoil</i> Kondisi Kering dan <i>Trefoil</i> kondisi Basah.....	77
4.6.1 Hasil Simulasi pada Pemasangan <i>Trefoil</i> dengan Kondisi Basah.....	77
4.6.1.1 Temperatur pada Kabel .....	78
4.6.1.2 Temperatur Diantara Konduktor .....	80
4.6.1.3 Persebaran Panas Secara Horizontal .....	81
4.6.2 Perbandingan Hasil Simulasi Pemasangan <i>Trefoil</i> Kering dan <i>Trefoil</i> Basah.....	82
4.6.2.1 Perbandingan Temperatur Konduktor .....	82
4.6.2.2 Perbandingan <i>Ampacity</i> Kabel .....	82
4.7 Perbandingan Temperatur pada Pemasangan Kabel Berjajar dan <i>Trefoil</i> dengan 9 Kabel.....	85
4.7.1 Hasil Simulasi pada Pemasangan Berjajar .....	85
4.7.2 Hasil Simulasi pada Pemasangan <i>Trefoil</i> .....	86
4.7.3 Perbandingan Temperatur Konduktor.....	87
4.7.4 Perbandingan <i>Ampacity</i> Kabel.....	87
4.8 Perbandingan Temperatur pada Pemasangan Kabel Berjajar dan <i>Trefoil</i> dengan <i>Volume Heat</i> Berbeda .....	88
4.8.1 Hasil Simulasi pada Pemasangan Berjajar.....	89
4.8.2 Hasil Simulasi pada Pemasangan <i>Trefoil</i> .....	89
4.8.3 Perbandingan Temperatur Konduktor.....	90
4.8.4 Perbandingan <i>Ampacity</i> Kabel.....	91
<b>BAB 5 PENUTUP</b>	
5.1 Kesimpulan .....	93
5.2 Saran .....	94
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	95
<b>RIWAYAT HIDUP</b> .....	97

## **TABLE OF CONTENT**

<b>COVER</b>	
<b>STATEMENT OF AUTHENTICITY</b>	
<b>APPROVAL SHEET</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	<i>i</i>
<b>ABSTRACT</b> .....	<i>iii</i>
<b>PREFACE</b> .....	<i>v</i>
<b>TABLE OF CONTENT</b> .....	<i>vii</i>
<b>LIST OF FIGURES</b> .....	<i>xi</i>
<b>LIST OF TABLES</b> .....	<i>xv</i>
 <b>CHAPTER 1 PRELIMINARY</b> .....	 <i>1</i>
1.1 Background .....	<i>1</i>
1.2 Systematic Discussion .....	<i>2</i>
 <b>CHAPTER 2 CABLE AND AMPACITY</b> .....	 <i>5</i>
2.1 Power System Cables.....	<i>5</i>
2.1.1 Conductor with Air Insulation .....	<i>5</i>
2.1.2 Insulation for Spacing .....	<i>6</i>
2.1.3 Insulation for Higher Voltage.....	<i>8</i>
2.1.3.1 Insulation Material.....	<i>9</i>
2.1.3.2 Conductor Shield.....	<i>10</i>
2.1.3.3 Insulation Screen Shield Specification .....	<i>10</i>
2.1.3.4 Insulation Screen Specification .....	<i>11</i>
2.1.3.5 Cable Covering .....	<i>11</i>
2.1.4 Medium Voltage Cables.....	<i>11</i>
2.1.4.1 N2XSY/NA2XSY.....	<i>12</i>
2.1.4.2 N2XSEY/NA2XSEY.....	<i>13</i>
2.1.4.3 N2XSEFGbY/NA2XSEFGbY .....	<i>14</i>
2.1.4.4 N2XSEBY/NA2XSEBY.....	<i>16</i>
2.2 Cable Ampacity.....	<i>17</i>
2.2.1 Soil Thermal Resistivity .....	<i>18</i>
2.2.2 Ampacity Calculation .....	<i>18</i>

## **CHAPTER 3 SIMULATION AND METHOD OF UNDERGROUND CABLES**

3.1	Finite Element Method (FEM)	21
3.2	Calculation of Finite Element Method	21
3.2.1	Discretize The Continuum	21
3.2.2	Determine Interpolation or Shape Functions	22
3.2.3	Formulation of Element Equations	22
3.2.4	Solve The System of Equation	23
3.2.5	Calculation The Secondary Quantities	23
3.3	Calculation of One Dimensional Linier Element	23
3.4	Calculation of Two Dimensional Linier Element	25
3.5	Construction and Specification of Underground Cables	28
3.6	Cable Materials	29
3.7	Cable Modeling	30
3.8	Underground Cable Formation Modeling	34
3.8.1	Flat Formation	34
3.8.2	Trefoil Formation	35
3.8.3	Flat Formation with Duct	36
3.8.4	Trefoil Formation with Duct	37

## **CHAPTER 4 SIMULATION RESULT AND DATA ANALYSIS**

4.1	Voltage, Current and Volume Heat on The Cable	39
4.2	Temperature Comparison of Flat and Trefoil Formation	40
4.2.1	Simulation Result on Flat Formation	40
4.2.1.1	Cable Temperature	41
4.2.1.2	Cable Spacing Temperature	43
4.2.1.3	Horizontal Heat Flow	44
4.2.2	Simulation Result on Trefoil Formation	45
4.2.2.1	Cable Temperature	47
4.2.2.2	Cable Spacing Temperature	49
4.2.2.3	Horizontal Heat Flow	50



4.2.3	Comparison of Flat and Trefoil Formation .....	51
4.2.3.1	Conductor Temperature Comparison .....	51
4.2.3.2	Cable Ampacity Comparison .....	52
4.3	Temperature Comparison on Flat Formation with Duct and without Duct.....	54
4.3.1	Simulation Result on Flat Formation with Duct.....	54
4.3.1.1	Cable Temperature.....	56
4.3.1.2	Inside Duct Temperature.....	57
4.3.1.3	Horizontal Heat Flow.....	57
4.3.2	Flat Formation with Duct and without Duct Comparison.....	58
4.3.2.1	Conductor Temperature Comparison .....	59
4.3.2.2	Cable Ampacity Comparison .....	59
4.4	Temperature Comparison on Trefoil Formation with Duct and without Duct.....	61
4.4.1	Simulation Result on Trefoil Formation with Duct.....	61
4.4.1.1	Cable Temperature.....	64
4.4.1.2	Inside Duct Temperature.....	64
4.4.1.3	Horizontal Heat Flow.....	66
4.4.1.4	Temperature Between Duct.....	66
4.4.2	Simulation Result Comparison on Trefoil Formation with Duct and without Duct.....	67
4.4.2.1	Conductor Temperature Comparison .....	68
4.4.2.2	Cable Ampacity Comparison .....	68
4.5	Temperature Comparison on Flat Formation in Wet Soil and Dry Soil.....	70
4.5.1	Simulation Result Comparison on Flat Formation in Wet Soil .....	70
4.5.1.1	Cable Temperature.....	71
4.5.1.2	Cable Spacing Temperature.....	72
4.5.1.3	Horizontal Heat Flow.....	73

4.5.2	Simulation Result Comparison on Flat Formation in Wet Soil and Dry Soil.....	74
4.5.2.1	Conductor Temperature Comparison .....	74
4.5.2.2	Cable Ampacity Comparison .....	75
4.6	Temperature Comparison on Trefoil Formation in Wet Soil and Dry Soil .....	77
4.6.1	Simulation Result Comparison on Flat Formation in Wet Soil .....	77
4.6.1.1	Cable Temperature.....	78
4.6.1.2	Cable Spacing Temperature.....	80
4.6.1.3	Horizontal Heat Flow.....	81
4.6.2	Simulation Result Comparison on Trefoil Formation in Wet Soil and Dry Soil.....	82
4.6.2.1	Conductor Temperature Comparison .....	82
4.6.2.2	Cable Ampacity Comparison .....	82
4.7	Temperature Comparison on Flat and Trefoil Formation with 9 Cable.....	85
4.7.1	Simulation Result on Flat Formation .....	85
4.7.2	Simulation Result on Trefoil Formation .....	86
4.7.3	Comparison of Conductor Temperature.....	87
4.7.4	Cable Ampacity Comparison .....	87
4.8	Temperature Comparison on Flat and Trefoil Formation with Diferrent Volume Heat.....	88
4.8.1	Simulation Result on Flat Formation .....	89
4.8.2	Simulation Result on Trefoil Formation .....	89
4.8.3	Comparison of Conductor Temperature.....	90
4.8.4	Cable Ampacity Comparison.....	91
<b>CHAPTER 5 CLOSURE</b>		
5.1	Conclusion .....	93
5.2	Suggestion.....	94
<b>BIBLIOGRAPHY</b> .....		95
<b>BIOGRAPHY</b> .....		97

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 2.1</b> Lokasi Tegangan dan Arus .....	5
<b>Gambar 2.2</b> Konduktor dengan bahan isolasi pelindung .....	7
<b>Gambar 2.3</b> Garis-garis medan listrik yang ingin dihilangkan .....	8
<b>Gambar 2.4</b> Konduktor dengan Bahan Isolasi dan Pelindung Isolasi.....	9
<b>Gambar 2.5</b> Kabel dengan Pelindung Konduktor.....	10
<b>Gambar 2.6</b> Ilustrasi pembentukan XLPE .....	12
<b>Gambar 2.7</b> Struktur Kabel N2XSY .....	13
<b>Gambar 2.8</b> Struktur Kabel N2XSEY .....	14
<b>Gambar 2.9</b> Struktur Kabel N2XSEFGbY .....	15
<b>Gambar 2.10</b> Struktur Kabel N2XSEBY .....	16
<b>Gambar 3.1</b> Contoh <i>mesh</i> , elemen segitiga, <i>node</i> , dan <i>edge</i> .....	22
<b>Gambar 3.2</b> Contoh elemen segitiga linier .....	26
<b>Gambar 3.3</b> Konstruksi Kabel N2SXY .....	28
<b>Gambar 3.4</b> Perhitungan jumlah serabut pada kabel .....	31
<b>Gambar 3.5</b> Pemodelan konduktor stranded.....	32
<b>Gambar 3.6</b> Pemodelan lengkap kabel N2XSY .....	33
<b>Gambar 3.7</b> Pemodelan penanaman kabel bawah tanah dengan metode berjajar langsung.....	34
<b>Gambar 3.8</b> Pemodelan penanaman kabel bawah tanah dengan metode <i>trefoil</i> langsung.....	35
<b>Gambar 3.9</b> Pemodelan penanaman kabel bawah tanah dengan metode berjajar dengan <i>duct</i> .....	36
<b>Gambar 3.10</b> Pemodelan penanaman kabel bawah tanah dengan metode <i>trefoil</i> dengan <i>duct</i> .....	37
<b>Gambar 4.1</b> Contoh pemodelan <i>volume heat</i> pada kabel.....	39
<b>Gambar 4.2</b> Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel berjajar.....	40
<b>Gambar 4.3</b> Gambar 4.3 Penarikan kurva untuk mendapatkan grafik (a) pada kabel (b) antar kabel (c) horizontal .....	41
<b>Gambar 4.4</b> Grafik perbandingan temperatur pada tiap kabel .....	42
<b>Gambar 4.5</b> Analisa grafik terhadap kabel .....	42
<b>Gambar 4.6</b> Grafik temperatur antar kabel .....	43
<b>Gambar 4.7</b> Grafik temperatur di sekitar kabel secara horizontal .....	44



<b>Gambar 4.8</b>	Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel trefoil .....	45
<b>Gambar 4.9</b>	Penarikan kurva untuk mendapatkan grafik (a) pada kabel (b) antar konduktor (c) diantara kabel (d) horizontal .....	46
<b>Gambar 4.10</b>	Grafik perbandingan temperatur pada tiap kabel .....	47
<b>Gambar 4.11</b>	Grafik perbandingan temperatur diantara 2 konduktor.....	48
<b>Gambar 4.12</b>	Grafik perbandingan temperatur diantara 3 kabel .....	49
<b>Gambar 4.13</b>	Grafik temperatur di sekitar kabel secara horizontal .....	50
<b>Gambar 4.14</b>	Skema perhitungan resistansi termal .....	52
<b>Gambar 4.15</b>	Hasil simulasi temperatur pemasangan kabel berjajar dengan duct.....	55
<b>Gambar 4.16</b>	Penarikan kurva untuk mendapatkan grafik (a) pada kabel (b) pada duct (c) horizontal.....	55
<b>Gambar 4.17</b>	Grafik perbandingan temperatur pada tiap kabel .....	56
<b>Gambar 4.18</b>	Grafik perbandingan temperatur pada tiap Duct.....	57
<b>Gambar 4.19</b>	Grafik temperatur di sekitar kabel secara horizontal .....	58
<b>Gambar 4.20</b>	Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel trefoil dengan duct .....	62
<b>Gambar 4.21</b>	Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel trefoil dengan duct (a) pada kabel (b) pada duct (c) horizontal (d) diantara duct.....	63
<b>Gambar 4.22</b>	Grafik perbandingan temperatur pada tiap kabel.....	64
<b>Gambar 4.23</b>	Grafik perbandingan temperatur pada tiap duct.....	65
<b>Gambar 4.24</b>	Grafik temperatur di sekitar kabel secara horizontal .....	66
<b>Gambar 4.25</b>	Grafik perbandingan temperatur diantara 3 duct .....	67
<b>Gambar 4.26</b>	Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel berjajar.....	71
<b>Gambar 4.27</b>	Grafik perbandingan temperatur pada tiap kabel .....	72
<b>Gambar 4.28</b>	Grafik temperatur antar kabel. ....	72
<b>Gambar 4.29</b>	Grafik temperatur di sekitar kabel secara horizontal. ....	73
<b>Gambar 4.30</b>	Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel berjajar.....	77
<b>Gambar 4.31</b>	Grafik perbandingan temperatur pada tiap kabel.....	78



<b>Gambar 4.32</b>	Grafik perbandingan temperatur diantara 2 konduktor	79
<b>Gambar 4.33</b>	Grafik perbandingan temperatur diantara 3 kabel.....	80
<b>Gambar 4.34</b>	Grafik temperatur di sekitar kabel secara horizontal.....	81
<b>Gambar 4.35</b>	Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel berjajar.....	86
<b>Gambar 4.36</b>	Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel <i>trefoil</i> .....	86
<b>Gambar 4.37</b>	Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel berjajar.....	89
<b>Gambar 4.38</b>	Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel <i>trefoil</i> .....	90



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 3.1</b> Spesifikasi kabel N2XSY .....	28
<b>Tabel 3.2</b> Spesifikasi elektris kabel N2XSY dengan Nom. Cross Section Area 630 mm <sup>2</sup> .....	29
<b>Tabel 3.3</b> Datasheet material penyusun kabel .....	30
<b>Tabel 4.1</b> Temperatur konduktor pada tiap pemasangan.....	51
<b>Tabel 4.2</b> Temperatur tanah di sekitar kabel pada pemasangan berjajar .....	53
<b>Tabel 4.3</b> Resistansi Termal pada Tiap Pemasangan .....	53
<b>Tabel 4.4</b> Ampacity pada Tiap Pemasangan .....	54
<b>Tabel 4.5</b> Temperatur Konduktor pada Pemasangan Berjajar .....	59
<b>Tabel 4.6</b> Temperatur tanah di sekitar kabel pada pemasangan berjajar dengan duct .....	60
<b>Tabel 4.7</b> Resistansi Termal pada Pemasangan Berjajar .....	60
<b>Tabel 4.8</b> Ampacity pada Pemasangan Berjajar .....	61
<b>Tabel 4.9</b> Temperatur Konduktor pada Pemasangan <i>trefoil</i> .....	68
<b>Tabel 4.10</b> Temperatur tanah di sekitar kabel pada pemasangan <i>trefoil</i> dengan duct .....	69
<b>Tabel 4.11</b> Resistansi Termal pada Pemasangan <i>trefoil</i> .....	69
<b>Tabel 4.12</b> Ampacity pada Pemasangan <i>Trefoil</i> .....	70
<b>Tabel 4.13</b> Temperatur konduktor pada pemasangan berjajar .....	74
<b>Tabel 4.14</b> Temperatur tanah di sekitar kabel pada pemasangan berjajar dalam kondisi basah .....	75
<b>Tabel 4.15</b> Resistansi Termal pada Pemasangan Berjajar .....	76
<b>Tabel 4.16</b> Ampacity pada Pemasangan Berjajar .....	76
<b>Tabel 4.17</b> Temperatur Konduktor pada Pemasangan <i>trefoil</i> .....	82
<b>Tabel 4.18</b> Temperatur tanah di sekitar kabel pada pemasangan <i>trefoil</i> dalam kondisi basah .....	83
<b>Tabel 4.19</b> Resistansi Termal pada Pemasangan <i>trefoil</i> .....	83
<b>Tabel 4.20</b> Ampacity pada Pemasangan <i>trefoil</i> .....	84
<b>Tabel 4.21</b> Temperatur Konduktor pada Tiap Pemasangan .....	87
<b>Tabel 4.22</b> Resistansi termal pada tiap pemasangan .....	88
<b>Tabel 4.23</b> Ampacity pada tiap pemasangan .....	88

<b>Tabel 4.24</b>	Temperatur Konduktor pada Tiap Pemasangan .....	90
<b>Tabel 4.25</b>	Temperatur tanah di sekitar kabel pada pemasangan berjajar .....	91
<b>Tabel 4.26</b>	Resistansi termal pada tiap pemasangan .....	91
<b>Tabel 4.27</b>	<i>Ampacity</i> pada tiap pemasangan .....	92
<b>Tabel 4.14</b>	Temperatur tanah di sekitar kabel pada pemasangan berjajar dalam kondisi basah .....	75
<b>Tabel 4.14</b>	Temperatur tanah di sekitar kabel pada pemasangan berjajar dalam kondisi basah .....	75
<b>Tabel 4.14</b>	Temperatur tanah di sekitar kabel pada pemasangan berjajar dalam kondisi basah .....	75

Temp



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang Masalah

Pada masa sekarang ini listrik sudah menjadi kebutuhan yang sangat mendasar bagi manusia, oleh karena itu pasokan listrik yang ada haruslah andal. Untuk menjaga keandalan dari suatu sistem kelistrikan maka banyak hal yang harus diperhatikan, salah satunya adalah bagaimana tenaga listrik tersebut disalurkan. Penyaluran tenaga listrik umumnya dibagi menjadi dua, yaitu transmisi dan distribusi.

Transmisi adalah penyaluran listrik dari suatu titik ke titik lain pada saluran tegangan tinggi atau tegangan ekstra tinggi. Di Indonesia saluran transmisi tegangan tinggi menggunakan tegangan 30 kV-150 kV, sedangkan saluran tegangan ekstra tinggi menggunakan tegangan 200 kV- 500 kV. Distribusi adalah penyaluran listrik dengan tegangan menengah dan rendah. Tegangan menengah yang digunakan adalah 6 kV, 12 kV dan 20 kV, sedangkan tegangan rendah yang digunakan adalah 220 V dan 380 V.

Salah satu komponen yang memegang peranan penting dalam penyaluran tenaga listrik adalah kabel. Kabel adalah suatu alat yang berfungsi untuk meyalurkan arus dari suatu titik ke titik lain pada suatu sistem tenaga listrik. Kabel memiliki berbagai macam jenis tergantung dari kebutuhannya. Berdasarkan pemasangannya pada umumnya dibagi menjadi dua, yaitu pemasangan saluran udara dan saluran bawah tanah.

Pada kawasan padat penduduk seperti di perkotaan, membangun jaringan transmisi dengan metode *overhead cable* merupakan hal yang cukup sulit dilakukan. Hal ini disebabkan karena masyarakat pada umumnya merasa tidak nyaman berada disekitar *tower* yang bertegangan tinggi. Selain itu masalah pembebasan lahan untuk mendirikan *tower* juga bukan perkara mudah. Oleh sebab itu idealnya pada kawasan padat penduduk listrik di transmisikan serta didistribusikan menggunakan sistem kabel bawah tanah. Sistem kabel bawah tanah ini memiliki keunggulan yaitu tidak perlu dilakukan pembebasan lahan, dan secara estetika juga lebih baik, karena tidak terlihat kabel yang menjuntai. Akan tetapi sistem kabel bawah tanah juga memiliki kekurangan, yaitu biaya yang lebih tinggi dan analisa yang lebih mendalam.

PT PLN (Persero) sebagai penyedia jasa listrik nasional sedang melaksanakan kebijakan untuk menyambungkan jaringan distribusi bawah tanah untuk wilayah DKI Jakarta, hal ini menjadi latar belakang penulis mengambil topik ini. Untuk membuat jaringan kabel bawah tanah salah satu hal yang harus diperhatikan adalah kemampuan hantaran kabel atau *ampacity* yang salah satunya dipengaruhi oleh temperatur di sekitar kabel bawah tanah.

Temperatur tanah di sekitar kabel pada kabel bawah tanah dipengaruhi oleh beberapa hal, yaitu kelembapan tanah, susunan pemasangan kabel, kedalaman pemasangan kabel, dan beberapa faktor lainnya. Susunan pemasangan kabel pada sistem yang sama dan arus yang sama ternyata dapat berpengaruh terhadap temperatur pada kabel maupun pada tanah disekitarnya. Oleh karena itu maka perlu dilakukan analisa temperatur terhadap masing-masing pemasangan dan pengaruhnya terhadap *ampacity* kabel. Analisis termal dilakukan untuk menentukan suhu pada konduktor kabel, dan bagaimana disipasi panas dari kabel tersebut.

Untuk menganalisa medan panas pada sistem kabel bawah tanah, ada beberapa metode yang bisa digunakan, antara lain *boundary element*, *finite difference*, dan *finite element method*. Pada tugas akhir ini, penulis menggunakan metode *finite element method*. Metode ini dipilih karena memiliki keunggulan yaitu dapat diaplikasikan untuk pemodelan yang rumit seperti geometri dari kabel. Analisa *ampacity* pada kabel bawah tanah pada umumnya dilakukan dalam tiga kondisi, yaitu saat *steady-state*, *transient*, dan saat *short circuit*, akan tetapi pada tugas akhir ini penulis hanya akan melakukan analisa pada saat keadaan *steady-state*. Pada tugas akhir ini, analisa perpindahan panas dengan metode *finite element method* meliputi perpindahan panas secara radiasi, konveksi, dan konduksi. Pada tugas akhir ini juga dimungkinkan beberapa analisa dengan indikator seperti jenis tanah, hambatan jenis tanah, suhu tanah, dan penggunaan *duct* di sistem kabel bawah tanah.

## **1.2. Sistematika Penulisan**

Untuk memudahkan dalam pembahasan yang akan dilakukan, maka pada penulisan tugas akhir ini, penulis membagi buku menjadi lima bab.

Bab pertama adalah pendahuluan yang berisi latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan sistematika penulisan

Bab kedua berisi tentang dasar teori yang digunakan dalam pengerjaan studi. Bab ini membahas mengenai kabel bawah tanah dan *ampacity* dari kabel.

Bab ketiga membahas mengenai modul pengujian simulasi yang dibuat, proses simulasi yang dilakukan, beserta parameter-parameter yang digunakan dalam simulasi.

Bab keempat memaparkan mengenai hasil dari simulasi dan juga analisa dari hasil simulasi, pengukuran suhu dengan metode *finite element method*, serta perhitungan *ampacity* kabel.

Bab kelima merupakan penutup yang berisikan tentang kesimpulan dari hasil analisa data dan saran.





## BAB II

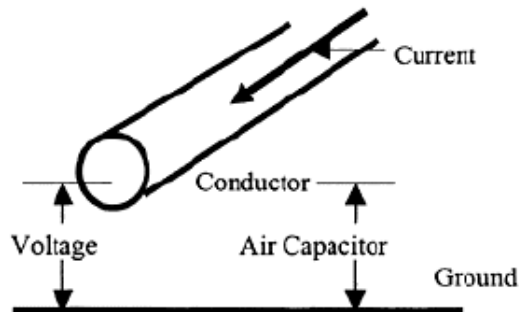
### KABEL DAN KEMAMPUAN HANTARAN ARUS

#### 2.1. Kabel pada Sistem Tenaga

Kegunaan dasar dari kabel adalah untuk menyalurkan arus listrik ke suatu tempat atau alat, baik itu untuk menyalurkan daya ataupun sinyal listrik. Untuk dapat menyalurkan arus listrik, maka dibutuhkan sebuah konduktor, dan harus dipastikan bahwa arus yang mengalir pada kabel tidak mengalir ke arah yang tidak diinginkan. Untuk mencegah arus listrik mengalir ke arah selain pada konduktor, maka sebuah isolasi berbahan dielektris digunakan untuk mengisolasi konduktor.

##### 2.1.1. Konduktor dengan Isolasi Udara

Sebuah konduktor berbahan metal yang tergantung dengan bantuan isolator, dikelilingi oleh udara dan membawa sinyal ataupun daya listrik adalah contoh yang paling mudah kita temui bila kita bicara mengenai konduktor dengan insulasi udara. Dari contoh ini kita bisa memvisualisasikan parameter-parameter yang ada pada pemasangan ini seperti arus dan tegangan seperti yang bisa kita lihat pada gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Lokasi Tegangan dan Arus

Pada gambar 2.1 tegangan berada diantara konduktor dan tanah, adanya jarak antara konduktor dengan tanah juga menyebabkan adanya kapasitansi, dan karena adanya konduktansi yang nilainya kecil diantara konduktor dan tanah, maka ada hambatan yang bernilai besar diantara konduktor dan tanah.

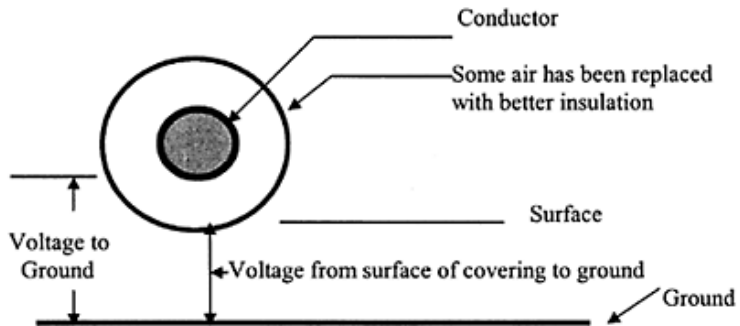
Udara bukanlah bahan isolasi yang sangat baik karena udara memiliki kekuatan tegangan tembus yang rendah bila dibandingkan dengan bahan isolasi lain. Hanya saja karena faktor biaya yang lebih murah, terutama bila digunakan pada area yang luas seperti sambungan SUTET maka isolasi udara digunakan.

Ketika tegangan diantara konduktor dan tanah terus naik, pada titik tertentu akan terjadi kondisi dimana konduktor mencapai titik jenuh secara elektris dan konduktor mengalami *breakdown* atau terjadi kegagalan isolasi pada udara. Pada titik ini udara mengalami proses ionisasi dan terbagi menjadi beberapa lapisan ionisasi bersifat konduktif yang mengelilingi konduktor. Proses ini dikenal dengan istilah korona, yang biasanya ditandai dengan adanya daya yang hilang dan dapat menyebabkan interferensi pada saluran radio, televisi, dan sinyal-sinyal lain. Pada isolasi udara ataupun pada gas lain, lapisan ionisasi ini berguna sebagai perluasan diameter konduktor secara elektris hingga udara yang berada diluar daerah yang mengalami ionisasi tidak lagi mengalami kejenuhan yang dapat menyebabkan terjadinya *breakdown* susulan [3].

### **2.1.2. Isolasi untuk Menghemat Ruang**

Pada bahan isolasi udara masalah yang dihadapi adalah diperlukan ruang udara yang luas agar tidak ada arus yang mengalir ke daerah yang tidak diinginkan. Hal ini menyebabkan kabel dengan bahan isolasi udara tidak dapat digunakan pada daerah dengan ruang terbatas seperti pada daerah perumahan ataupun daerah padat penduduk.

Oleh sebab itu maka langkah selanjutnya adalah mengganti udara dengan bahan lain sebagai bahan isolasi konduktor. Pada gambar 2.2 dapat kita lihat bahwa tegangan dari



**Gambar 2.2** Konduktor dengan bahan isolasi pelindung

konduktor ke tanah sama dengan tegangan pada bahan isolasi udara. Sebuah pembagi tegangan muncul akibat adanya impedansi dari batang konduktor ke permukaan bahan isolasi, dan dari permukaan bahan isolasi ke tanah. Persebaran tegangan dari konduktor ke permukaan bahan isolasi dan dari permukaan bahan isolasi ke tanah akan proporsional dengan impedansinya.

Besarnya arus yang dapat mengalir dari bahan isolasi yang dalam kondisi baik ke tanah akibat adanya kontak dengan objek yang bersentuhan dengan tanah dibatasi oleh ketebalan, konstanta dielektrik, dan impedansi permukaan dari bahan isolasi tersebut dan juga luas daerah yang mengalami kontak [3].

Pada permukaan bahan isolasi kabel dengan tegangan rendah, arus yang muncul sangatlah kecil dan tidak terasa. Tegangan rendah yang dimaksud adalah *rating* tegangan berdasarkan tegangan antar fasa yang bernilai kurang dari atau sama dengan 600 volt. Ketika kondisi ini terpenuhi, maka dapat dikatakan bahwa bahan isolasi kabel tersebut baik dan dapat disentuh oleh objek yang bersentuhan dengan tanah secara terus menerus, selama sentuhan objek tersebut tidak mengakibatkan kerusakan secara kimia dan termal terhadap kabel dan bahan isolasinya.

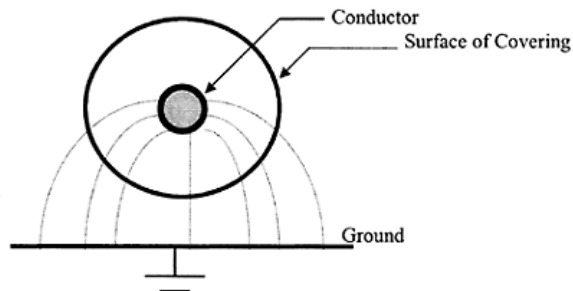
Bahan isolasi dari kabel sangat berpengaruh dengan kontak kabel tersebut dengan benda lain, oleh sebab itu penentuan ketebalan dari bahan isolasi kabel dengan tegangan rendah pada umumnya lebih menggunakan pertimbangan secara mekanis daripada pertimbangan secara elektris. Pertimbangan seperti keadaan lingkungan di sekitar kabel, ketahanan terhadap sinar matahari, dan ketahanan terhadap api,

terkadang sangat sulit untuk dipenuhi dengan satu jenis bahan isolasi saja, oleh sebab itu terkadang digunakan dua bahan isolasi.

### 2.1.3. Isolasi untuk Tegangan Lebih Besar

Pada bahan isolasi udara dan isolasi untuk menghemat ruang, ketika kabel berada dekat atau menyentuh pentanahan maka garis-garis medan listrik harus dihilangkan pada sudut-sudut yang tepat. Pada gambar 2.3 dapat kita lihat garis-garis medan listrik yang harus dihilangkan. Pada gambar dapat kita lihat bawah garis *equipotential* tegak lurus dengan garis medan, garis-garis medan yang melengkung menghasilkan perbedaan tegangan pada permukaan pelindung kabel. Pada tegangan yang kecil efek pada permukaan kabel ini dapat diabaikan. Ketika tegangan semakin besar sampai pada titik dimana besarnya tegangan mencukupi untuk mengakibatkan arus mengalir pada permukaan dari pelindung kabel. Fenomena ini dikenal dengan sebutan *tracking*. arus yang Walaupun ada di permukaan nilainya kecil, resistansi permukaan yang bernilai besar menyebabkan terjadinya pemanasan pada permukaan kabel yang dapat merusak bahan isolasi kabel. Bila kondisi ini dibiarkan terus-menerus dapat menyebabkan kerusakan yang besar, dan bila ada kontak dengan tanah, bisa terjadi kegagalan isolasi [3].

Pada awalnya mungkin terpikirkan untuk menambah ketebalan isolasi seiring dengan naiknya nilai tegangan. Akan tetapi ketahanan tembus, erosi pada permukaan, dan keselamatan pekerja yang berada disekitar kabel tidak berbanding lurus dengan kenaikan tegangan dan ketebalan isolasi, sehingga pendekatan ini tidak dapat dilakukan.



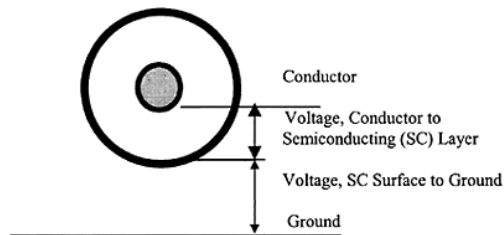
**Gambar 2.3** Garis-garis medan listrik yang ingin dihilangkan



### 2.1.3.1. Bahan Pelindung Isolasi

Pada konduktor dengan bahan isolasi udara, kita misalkan permukaan tanah kita bungkus melingkari konduktor pada ketebalan yang sama dengan udara. Ketika kondisi ini, maka garis-garis medan listrik dari konduktor ke tanah akan tegak lurus karena mencari jalan terpendek dari konduktor ke tanah. Konfigurasi ini akan membentuk sebuah kapasitor silindris dan menjadi bahan dielektris yang efektif. Untuk membuat kondisi konfigurasi konduktor dan tanah tersebut memungkinkan, maka sebuah lapisan semikonduktor yang bersifat resistif dipasang melingkari permukaan isolasi kabel. Material ini memaksakan garis-garis medan listrik yang melengkung terjadi di dalam lapisan bahan semikonduktor tersebut. Pada gambar 2.4 dapat kita lihat bahwa kapasitor berbentuk silindris terbentuk dari konduktor ke bahan semikonduktor yang melindungi permukaan bahan isolasi, dan kapasitor lainnya terbentuk dari permukaan bahan semikonduktor ke tanah. Muatan dalam jumlah yang besar dapat terjadi pada kapasitor yang terjadi antara permukaan bahan semikonduktor dan tanah dikarenakan lapisan semikonduktor pada bagian luar kabel menyebabkan muatan dapat bergerak dengan leluasa pada lapisan semikonduktor tersebut. Arus *charging* ini harus dikendalikan agar jalur dari lapisan semikonduktor ke tanah tidak terbentuk. Bila sampai terbentuk jalur dari lapisan semikonduktor ke tanah, maka lapisan semikonduktor tersebut bisa terbakar dan terjadi kegagalan isolasi. Hal ini juga bisa berbahaya terhadap manusia yang berada di sekitar kabel tersebut [3].

Sangat penting untuk memastikan bahwa terjadi kontak yang berkelanjutan antara lapisan pelindung dengan tanah untuk membuang arus *charging* yang bersifat kapasitif tanpa merusak kabel. Untuk itu ditambahkan sebuah lapisan berbahan metal yang bersentuhan dengan



**Gambar 2.4** Konduktor dengan Bahan Isolasi dan Pelindung Isolasi

lapisan semikonduktor dan menghasilkan sambungan dengan tahanan yang relatif kecil terhadap tanah.

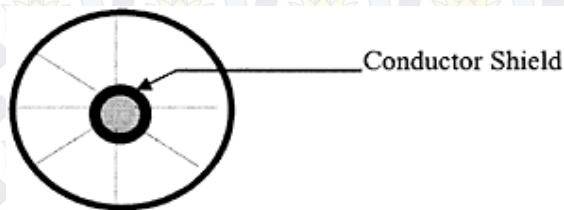
### 2.1.3.2 Lapisan Pelindung Konduktor

Lapisan pelindung pada bahan isolasi kabel menyebabkan komplikasi lain. Lapisan pelindung isolasi yang diketanahkan mengakibatkan seluruh persebaran tegangan berada pada daerah isolasi dari kabel. Seperti pada kasus konduktor dengan bahan isolasi udara, kita harus memperhatikan kemungkinan timbulnya tegangan yang melebihi batas kekuatan isolasi kabel. Masalah ini dapat timbul pada konduktor dengan tipe berinti banyak ataupun pada konduktor solid yang mengalami cacat fisik seperti goresan ataupun kerusakan lain.

Pada gambar 2.5 sebuah lapisan semikonduktif ditambahkan sebagai pelapis pada konduktor untuk memperhalus segala ketidakseragaman pada konduktor. Dengan adanya lapisan pelindung konduktor ini mengurangi kemungkinan tegangan menembus dari konduktor ke lapisan isolasi. Adanya tegangan yang menembus ke lapisan isolasi dapat memusatkan *stress* pada bahan isolasi yang bila dibiarkan dalam jangka waktu yang panjang dapat mengurangi kekuatan dielektris dari bahan isolasi tersebut.

### 2.1.3.3. Persyaratan Lapisan Pelindung Isolasi

Ada beberapa syarat yang harus dipenuhi oleh lapisan pelindung isolasi dari kabel untuk mengurangi peningkatan *stress* pada lapisan isolasi. Hal yang harus diperhatikan adalah bentuk dari lapisan pelindung. Lapisan pelindung harus dalam bentuk yang baik, tidak boleh ada cacat produksi seperti adanya tonjolan ataupun kerusakan, karena ketika lapisan mengalami cacat dalam bentuknya maka lapisan pelindung tersebut tidak dapat mengurangi peningkatan *stress* pada lapisan isolasi.



**Gambar 2.5** Kabel dengan Pelindung Konduktor

#### **2.1.3.4. Persyaratan Lapisan Isolasi**

Pada tegangan menengah dan tinggi, sangat penting untuk dipastikan bahwa baik lapisan isolasi maupun lapisan pelindung isolasi bebas dari kontaminan. Kontaminasi pada lapisan ini dapat berakibat pada peningkatan *stress* pada bahan isolasi yang dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya kegagalan isolasi pada kabel. Adanya lubang pada lapisan isolasi juga dapat menyebabkan efek yang sama dengan adanya kontaminan, selain itu lubang juga dapat menyebabkan timbulnya *capacitive-resistive discharge* pada lubang yang terisi oleh gas saat tegangan muncul pada lubang tersebut. Adanya *discharge* tersebut dapat merusak bahan isolasi kabel dan mengakibatkan kegagalan isolasi [3].

#### **2.1.3.5. Lapisan Pembungkus Kabel**

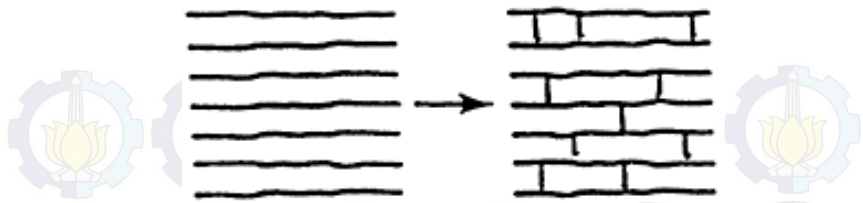
Pada kabel untuk tegangan rendah, lapisan pembungkus kabel pada umumnya digunakan untuk melindungi lapisan-lapisan dibawahnya dari sinar matahari, api, goresan, ataupun terpapar zat kimia. Pada kabel untuk tegangan menengah, paparan zat kimia juga timbul akibat korosi pada lapisan pelindung berbahan metal. Pada kabel untuk tegangan menengah dan tinggi, lapisan pembungkus kabel juga dipakai untuk tujuan yang sama dengan lapisan pembungkus pada kabel dengan tegangan rendah, akan tetapi lapisan pembungkus tersebut didesain sedemikian rupa untuk melindungi lapisan dibawahnya yang berbahan metal dari korosi.

#### **2.1.4. Kabel pada Tegangan Menengah**

Pada tegangan menengah kabel yang digunakan pada umumnya adalah kabel dengan bahan isolasi XLPE atau *cross linked polyethylene*. XLPE adalah hasil reaksi kimia dari bahan *polyethylene* yang berbeda-beda sehingga menghasilkan rangkaian *polyethylene* yang lebih kuat dan lebih tahan terhadap kenaikan temperatur [1].

Pada gambar 2.6 dapat kita lihat penjelasan singkat mengenai proses *crosslinking*. Pada gambar disebelah kiri dimisalkan adalah susunan polimer dari *polyethylene* (PE). Akibat dari proses kimia yang terjadi pada beberapa rantai PE ini menyebabkan munculnya lengan yang mengikat di antara rantai-rantai PE yang awalnya terpisah. Akibat adanya lengan-lengan inilah kekuatan fisik dari rantai PE ini bertambah, dan rantai-rantai kimiawi ini disebut dengan nama XLPE. Kekuatan dan ketahanan dari bahan ini dapat kita lihat pada data material dari XLPE





**Gambar 2.6** Ilustrasi pembentukan XLPE

dan PE. Dari data material tersebut dapat kita lihat bahwa XLPE memiliki nilai kekuatan tarikan, dan Modulus Young yang lebih besar bila dibandingkan dengan PE.

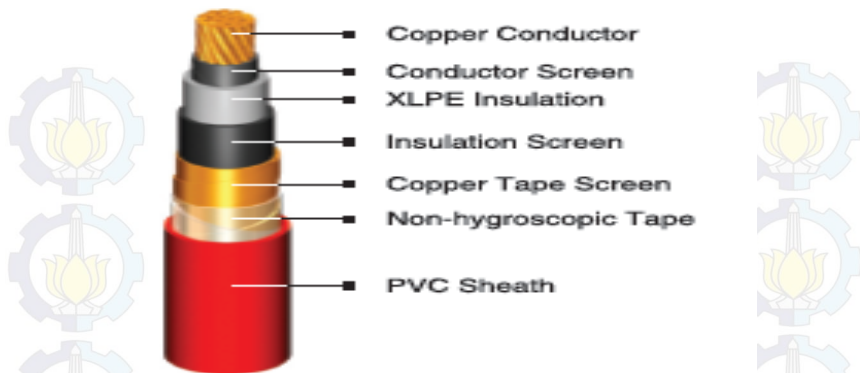
Pada kabel tegangan menengah, sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) secara umum kabel dibagi menjadi dua berdasarkan bahan konduktornya, yaitu kabel dengan konduktor aluminium dan kabel dengan konduktor tembaga. Akan tetapi untuk lapisan perlindungan dan isolasinya sebenarnya sama untuk kedua jenis konduktor tersebut. Oleh sebab itu pada penjelasan selanjutnya untuk jenis kabel dengan jenis bahan isolasi yang sama pembahasannya akan disatukan antara kabel dengan konduktor aluminium dan kabel dengan konduktor tembaga.

#### **2.1.4.1. N2XS<sub>Y</sub>/NA2XS<sub>Y</sub>**

Kabel jenis ini adalah kabel tegangan menengah yang memiliki satu inti kabel. Dari kode kabel ini kita bisa mendapatkan penjelasan mengenai bentuk kabel ini. Kode N atau NA menunjukkan bahan dari konduktor yang digunakan. N untuk tembaga, dan NA untuk aluminium. 2X adalah kode untuk bahan isolasi dari konduktor yang berupa XLPE. S merupakan kode untuk bahan lapisan metalik yang melindungi bahan isolasi, sedangkan Y adalah kode untuk lapisan terluar dari kabel yang berbahan PVC.

Pada gambar 2.7 dapat kita lihat lapisan dari kabel ini terdiri dari tujuh bagian. Bagian pertama adalah konduktor yang kemudian dibungkus dengan *conductor screen* yang berbahan karet yang spesifik yaitu EPR atau *Ethyl-propylene rubber*. Lapisan selanjutnya adalah bahan isolasi utama yaitu XLPE yang kemudian dilapisi dengan *insulation screen* yang juga berbahan karet yang sama dengan *conductor screen* yaitu EPR. Lapisan selanjutnya adalah lapisan metalik yang berbahan tembaga yang dilapisi oleh sebuah pita yang berfungsi sebagai penghalang agar tidak ada cairan yang dapat masuk kedalam kabel.





**Gambar 2.7** Struktur Kabel N2XSY

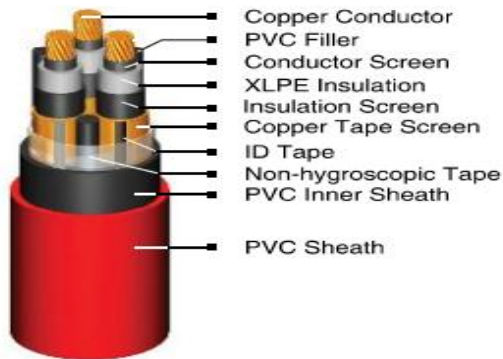
Sementara pada lapisan terluar adalah bagian pelindung kabel yang terbuat dari bahan PVC.

Kabel ini biasa digunakan untuk keperluan seperti distribusi bawah tanah, pembangkit dan *switchgear*. Kabel ini digunakan pada rentang tegangan 6 kV sampai dengan 30 kV. Ukuran konduktor dari kabel ini juga memiliki beberapa pilihan, dari 25 mm<sup>2</sup> sampai 630 mm<sup>2</sup>.

#### **2.1.4.2 N2XSEY/ NA2XSEY**

Kabel jenis ini adalah kabel tegangan menengah yang memiliki tiga inti kabel. Dari kode kabel ini kita bisa mendapatkan penjelasan mengenai bentuk kabel ini. Kode N atau NA menunjukkan bahan dari konduktor yang digunakan. N untuk tembaga, dan NA untuk aluminium. 2X adalah kode untuk bahan isolasi dari konduktor yang berupa XLPE. SE merupakan kode untuk bahan lapisan metalik yang melindungi bahan isolasi, perbedaannya dengan kode S adalah SE artinya lapisan metalik ini melapisi masing-masing bahan isolasi pada ketiga inti kabel. Sedangkan Y adalah kode untuk lapisan terluar dari kabel yang berbahan PVC

Pada gambar 2.8 dapat kita lihat lapisan dari kabel ini terdiri dari sepuluh bagian. Bagian pertama adalah tiga buah konduktor yang masing-masing dibungkus dengan *conductor screen* yang berbahan karet yang spesifik yaitu EPR atau *Ethyl-propylene rubber*. Lapisan selanjutnya adalah bahan isolasi utama yaitu XLPE yang kemudian dilapisi dengan *insulation screen* yang juga berbahan karet



**Gambar 2.8** Struktur Kabel N2XSEY

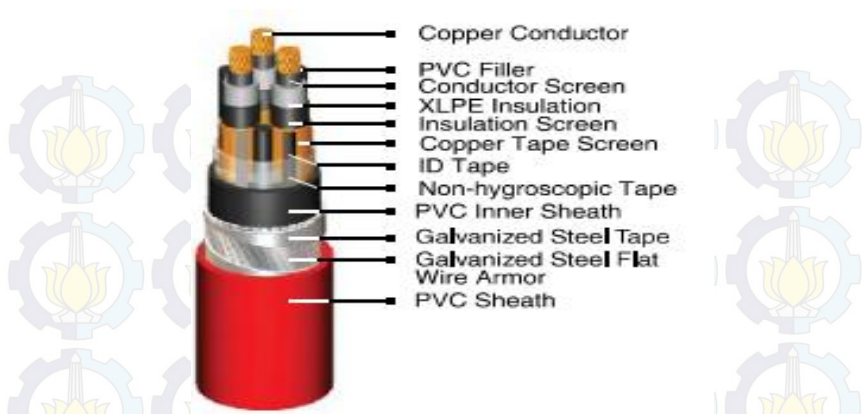
yang sama dengan *conductor screen* yaitu EPR. Lapisan selanjutnya adalah lapisan metalik yang berbahan tembaga yang kemudian diberi ID tape yang berfungsi untuk pemberian kode kabel. Seluruh lapisan diatas melapisi masing-masing konduktor yang berjumlah tiga buah.

Ketiga konduktor yang sudah dilapisi dengan lapisan pelindung kemudian ditambahkan dengan PVC *filler* untuk menjaga bentuk kabel lalu disatukan dengan *non-hygroscopic tape* yaitu pita pelindung yang berfungsi untuk mencegah air atau minyak masuk ke dalam kabel. Setelah itu kabel dilapisi dengan dua buah lapisan PVC, satu dibagian dalam dan satu di bagian luar. Lapisan PVC yang dibagian dalam berfungsi untuk mengikat ketiga inti kabel sedangkan lapisan PVC ini bertujuan untuk memberikan kekuatan fisik pada kabel tersebut.

Kabel ini biasa digunakan untuk keperluan seperti distribusi bawah tanah, pembangkit dan *switchgear*. Kabel ini digunakan pada rentang tegangan 6 kV sampai dengan 30 kV. Ukuran konduktor dari kabel ini juga memiliki beberapa pilihan, dari 25 mm<sup>2</sup> sampai 300 mm<sup>2</sup>.

#### 2.1.4.3 N2XSEFGbY/ NA2XSEFGbY

Kabel jenis ini adalah kabel tegangan menengah yang memiliki tiga inti kabel. Dari kode kabel ini kita bisa mendapatkan penjelasan mengenai bentuk kabel ini. Kode N atau NA menunjukkan bahan dari konduktor yang digunakan. N untuk tembaga, dan NA untuk aluminium. 2X adalah kode untuk bahan isolasi dari konduktor yang berupa XLPE. SE merupakan kode untuk bahan lapisan metalik yang



**Gambar 2.9** Struktur Kabel N2XSEFGbY

melindungi bahan isolasi, perbedaannya dengan kode S adalah SE artinya lapisan metalik ini melapisi masing-masing bahan isolasi pada ketiga inti kabel. Pada kabel ini dilengkapi dengan *armour* yang ditandai dengan adanya kode F dan Gb. Kode F adalah simbol untuk *armour* yang berbentuk *flat wire*, sedangkan kode Gb adalah untuk *steel tape* yaitu pita metalik yang berfungsi untuk mengikat lapisan *flat wire*. Baik *flat wire* dan *steel tape* keduanya terbuat dari bahan baja yang sudah melalui proses galvanisasi. Kode Y adalah untuk lapisan terluar dari kabel yang berbahan PVC

Pada gambar 2.9 dapat kita lihat lapisan dari kabel ini terdiri dari dua belas bagian. Bagian pertama adalah tiga buah konduktor yang masing-masing kemudian dibungkus dengan *conductor screen* yang berbahan karet yang spesifik yaitu EPR atau *Ethyl-propylene rubber*. Lapisan selanjutnya adalah bahan isolasi utama yaitu XLPE yang kemudian dilapisi dengan *insulation screen* yang juga berbahan karet yang sama dengan *conductor screen* yaitu EPR. Lapisan selanjutnya adalah lapisan metalik yang berbahan tembaga yang kemudian diberi ID tape yang berfungsi untuk pemberian kode kabel. Seluruh lapisan diatas melapisi masing-masing konduktor yang berjumlah tiga buah.

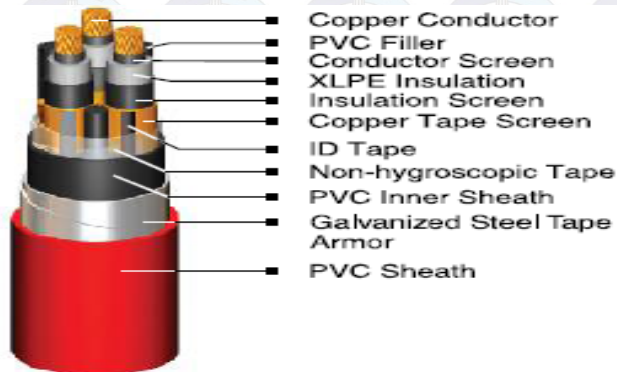
Ketiga konduktor yang sudah dilapisi dengan lapisan pelindung kemudian ditambahkan dengan PVC *filler* untuk menjaga bentuk kabel lalu disatukan dengan *non-hygroscopic tape* yaitu pita pelindung yang berfungsi untuk mencegah air atau minyak masuk ke dalam kabel. Setelah itu kabel dilapisi dengan lapisan PVC yang berfungsi untuk mengikat ketiga inti kabel. Kemudian kabel dilapisi lagi dengan *armour*

yang berfungsi untuk memberikan perlindungan serta kekuatan fisik pada kabel. *Armour* ini terbuat dari lapisan baja galvanis yang berbentuk kabel pipih yang kemudian diikat dengan pita yang juga terbuat dari baja galvanis untuk memastikan kabel pipih pada *armour* terikat rapat dan tidak bergerak. Kemudian dilapisan terluar dilapisi dengan lapisan PVC yang bertujuan untuk memberikan kekuatan fisik pada kabel tersebut.

Kabel ini biasa digunakan untuk keperluan seperti distribusi bawah tanah, pembangkit dan *switchgear*. Adanya *armour* pada kabel membuat kabel ini bisa digunakan untuk pemasangan pada kondisi medan yang cukup rawan seperti pada pemasangan kabel bawah tanah di bawah jalan raya. Kabel ini digunakan pada rentang tegangan 6 kV sampai dengan 30 kV. Ukuran konduktor dari kabel ini juga memiliki beberapa pilihan, dari 25 mm<sup>2</sup> sampai 300 mm<sup>2</sup>.

#### 2.1.4.3 N2XSEBY / NA2XSEBY

Kabel jenis ini adalah kabel tegangan menengah yang memiliki tiga inti kabel. Dari kode kabel ini kita bisa mendapatkan penjelasan mengenai bentuk kabel ini. Kode N atau NA menunjukkan bahan dari konduktor yang digunakan. N untuk tembaga, dan NA untuk aluminium. 2X adalah kode untuk bahan isolasi dari konduktor yang berupa XLPE. SE merupakan kode untuk bahan lapisan metalik yang melindungi bahan isolasi, perbedaannya dengan kode S adalah SE artinya lapisan metalik ini melapisi masing-masing bahan isolasi pada ketiga inti kabel. Pada kabel ini dilengkapi dengan *armour* yang ditandai



**Gambar 2.10** Struktur Kabel N2XSEBY



dengan adanya kode B. Kode B adalah simbol untuk *armour* yang berupa *steel tape* atau pita metalik yang membungkus kabel dan berfungsi untuk memberikan kekuatan fisik pada kabel. *Steel tape* tersebut terbuat dari bahan baja yang sudah melalui proses galvanisasi. Kode Y adalah untuk lapisan terluar dari kabel yang berbahan PVC

Pada gambar 2.10 dapat kita lihat lapisan dari kabel ini terdiri dari sebelas bagian. Bagian pertama adalah tiga buah konduktor yang masing-masing kemudian dibungkus dengan *conductor screen* yang berbahan karet yang spesifik yaitu EPR atau *Ethyl-propylene rubber*. Lapisan selanjutnya adalah bahan isolasi utama yaitu XLPE yang kemudian dilapisi dengan *insulation screen* yang juga berbahan karet yang sama dengan *conductor screen* yaitu EPR. Lapisan selanjutnya adalah lapisan metalik yang berbahan tembaga yang kemudian diberi ID tape yang berfungsi untuk pemberian kode kabel. Seluruh lapisan diatas melapisi masing-masing konduktor yang berjumlah tiga buah.

Ketiga konduktor yang sudah dilapisi dengan lapisan pelindung kemudian ditambahkan dengan *PVC filler* untuk menjaga bentuk kabel lalu disatukan dengan *non-hygroscopic tape* yaitu pita pelindung yang berfungsi untuk mencegah air atau minyak masuk ke dalam kabel. Setelah itu kabel dilapisi dengan lapisan PVC yang berfungsi untuk mengikat ketiga inti kabel. Kemudian kabel dilapisi lagi dengan *armour* yang berfungsi untuk memberikan perlindungan serta kekuatan fisik pada kabel. *Armour* ini terbuat dari lapisan baja galvanis berbentuk pita yang menyelubungi seluruh kabel. Kemudian dilapisi terluar dilapisi dengan lapisan PVC yang bertujuan untuk memberikan kekuatan fisik pada kabel tersebut.

Kabel ini biasa digunakan untuk keperluan seperti distribusi bawah tanah dengan pemasangan langsung, pembangkit dan *switchgear*. Adanya *armour* pada kabel membuat kabel ini bisa digunakan untuk pemasangan pada kondisi medan yang cukup rawan seperti pada pemasangan kabel bawah tanah di bawah jalan raya. Kabel ini digunakan pada rentang tegangan 6 kV sampai dengan 30 kV. Ukuran konduktor dari kabel ini juga memiliki beberapa pilihan, dari 25 mm<sup>2</sup> sampai 300 mm<sup>2</sup>.

## **2.2. Kemampuan Hantaran Arus pada Kabel**

Kemampuan hantaran arus atau yang biasa dikenal dengan istilah *ampacity* pada kabel adalah jumlah arus maksimal yang dapat dibawa sebuah kabel pada kondisi normal tanpa mempertimbangkan

penurunan kondisi lingkungan sekitar yang terjadi secara tiba-tiba. Istilah *ampacity* ini pertama kali diperkenalkan oleh William Del Mar pada tahun 1950an awal ketika istilah *current carrying capacity* dinilai terlalu panjang untuk diucapkan [3].

Ketika kabel dilalui oleh arus, maka kabel tersebut akan menjadi sebuah sumber panas. Energi panas ini menyebabkan suhu pada kabel meningkat, dan harus dijaga agar suhu pada kabel tidak melewati batas yang diijinkan. Ada beberapa sumber panas dalam sebuah kabel, seperti *losses* pada konduktor akibat aliran arus, *dielectric loss* pada bahan isolasi, dan arus yang mengalir pada pelindung ataupun *armour*.

Sumber panas hasil dari kenaikan suhu pada kabel harus dialirkan keluar kabel melewati material yang memiliki resistansi beragam terhadap panas tersebut. Resistansi tersebut meliputi bahan isolasi kabel, pelindung bahan isolasi, pelapis terluar kabel, udara, tanah, dan lain-lain.

### **2.2.1. Resistivitas Termal pada Tanah**

Resistivitas termal pada tanah adalah aspek yang jarang dipertimbangkan pada rangkaian termal. Jarak yang bisa ditempuh oleh panas pada tanah lebih jauh bila di bandingkan dengan dimensi kabel ataupun *duct* pada kabel, sehingga dapat dikatakan bahwa resistivitas tanah adalah faktor yang sangat signifikan dalam perhitungan *ampacity*. Aspek lain yang harus dipertimbangkan adalah kestabilan dari tanah setelah proses pemanasan yang panjang. Energi panas cenderung membuat kelembapan pada tanah untuk keluar dan meningkatkan resistivitas dari tanah tersebut [6].

### **2.2.2. Perhitungan Kemampuan Hantaran Arus pada Kabel**

Pada tahun 1957 Jack Neher dan Martin McGrath menerbitkan tulisan ilmiah yang berisi metode perhitungan kemampuan hantaran arus pada kabel. Pada tahun 1995 IEEE merevisi dan menerbitkan sebuah buku yang dikenal dengan istilah *black book* yang berisi tabel mengenai kemampuan hantaran kabel yang dihitung berdasarkan teori dari Jack Neher dan Martin McGrath.

Teori dasar mengenai perpindahan panas pada saat kondisi *steady state* sama dengan hukum Ohm dimana perpindahan panas arahnya beragam seperti suhu dan berbanding terbalik dengan resistansi termal

$$I = \sqrt{\frac{T_c - T_A - \Delta T_D}{R_{el} \times R_{th}}} \times 10^{-3} \quad (2.1)$$

dimana:

- $I$  = Kemampuan Hantaran Arus pada kabel (A)
- $T_c$  = Suhu maksimal yang diperbolehkan pada konduktor ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_A$  = Suhu tanah disekitar kabel ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\Delta T_D$  = Kenaikan suhu akibat rugi-rugi dielektrik ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $R_{el}$  = Resistansi elektrik konduktor pada  $T_c$  ( $\Omega/\text{ft}$ )
- $R_{th}$  = Resistansi termal dari konduktor ke lingkungan ( $\Omega/\text{ft}$ )

Selain persamaan Neher-McGrath, juga ada rumus lain untuk menghitung *ampacity* pada kabel berdasarkan standar IEC 60287 yaitu

$$I = \sqrt{\frac{T_c - T_a}{R_{dc} \cdot R_{ca}}} \quad (2.2)$$

dimana

- $I$  = Ampacity (A)
- $T_c$  = Temperatur konduktor ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_a$  = Temperatur tanah sekitar ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $R_{dc}$  = Resistansi DC konduktor ( $\Omega/\text{m}$ )
- $R_{ca}$  = Resistansi termal antara konduktor dan tanah ( $\text{K.m/W}$ )





## **BAB III**

### **METODE DAN SIMULASI KABEL BAWAH TANAH**

#### **3.1 Metode Elemen Hingga (FEM)**

Untuk menganalisa kondisi termal pada kabel bawah tanah maka perlu dilakukan simulasi persebaran panas pada kabel dandera disekitarnya. Simulasi dilakukan menggunakan CST Studio Suite, basis metode yang digunakan adalah Metode Elemen Hingga atau FEM (*Finite Element Method*). Prinsip dasar dari metode elemen hingga adalah proses diskretisasi. Dalam proses diskretisasi, suatu benda atau daerah yang dianalisis dibagi kedalam bentuk *mesh* (kumpulan elemen) yang saling terhubung, dan kemudian dimodelkan kedalam bentuk satu, dua atau tiga dimensi.

Analisis penyelesaian FEM dapat dibagi menjadi dua, yaitu :

1. Analisis struktur

Analisis struktur digunakan untuk menganalisis tegangan pada struktur rangka, getaran, *bucking*.

2. Analisis non-struktur.

Analisis non-struktur digunakan untuk menganalisis kejadian transfer panas, aliran fluida, distribusi dari potensial medan magnet dan medan listrik.

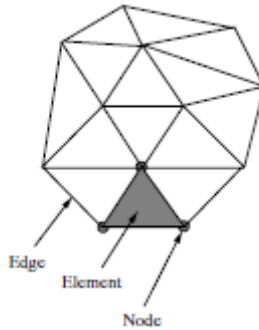
Dalam tugas akhir ini analisis yang digunakan untuk mensimulasikan distribusi panas pada kabel bawah tanah adalah analisis non-struktur.

#### **3.2. Dasar Perhitungan Finite Element Method**

FEM (*Finite Element Method*) adalah sebuah metode numerik yang digunakan untuk melakukan pendekatan perhitungan medan listrik ataupun temperatur pada suatu objek dengan proses diskritisasi. Untuk memulai pemodelan numerik terhadap sebuah objek, maka terlebih dahulu dilakukan pemodelan secara fisik dari objek tersebut. Setelah melakukan pemodelan, maka dilakukan langkah langkah selanjutnya.

##### **3.2.1. Proses Diskritisasi**

Proses diskritisasi adalah proses dimana kita membagi objek yang akan dianalisa menjadi bagian-bagian kecil yang tidak saling menimpa. Pada tugas akhir ini objek didiskritisasi menjadi bagian kecil yang berbentuk elemen segitiga. Setiap elemen dibentuk dari sejumlah



**Gambar 3.1** Contoh *mesh*, elemen segitiga, *node*, dan *edge*

*node* seperti pada gambar 3.1. Jumlah titik pada tiap elemen tergantung dari jenis elemen yang digunakan.

### 3.2.2. Menentukan Interpolasi atau Fungsi yang Digunakan

Langkah selanjutnya adalah menentukan jenis fungsi interpolasi yang akan merepresentasikan variabel luasan permukaan yang bervariasi pada sebuah elemen.

### 3.2.3. Memformulasikan Persamaan Elemen

Selanjutnya kita menentukan persamaan matriks yang dapat mewakili sifat dari masing-masing elemen penyusun objek dengan membentuk sebuah elemen matriks LHS (*Left Hand Side*) dan *Load Vector*. Sebagai contoh, fungsi LHS dan *Load Vector* pada umumnya dapat dituliskan dalam persamaan

$$[K]_e = \frac{Ak}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\{f\}_e = \begin{bmatrix} Q_i \\ Q_j \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

dimana  $_e$  adalah elemen yang akan dimodelkan,  $Q$  adalah total panas yang ditransfer,  $k$  adalah konduktifitas termal,  $l$  adalah panjang jarak pada elemen linier satu dimensi, sedangkan  $i$  dan  $j$  adalah titik-titik yang membentuk suatu elemen.

### 3.2.4. Menyusun Persamaan Elemen dalam Suatu Persamaan Sistem

Untuk mencari temperatur dari sistem secara keseluruhan, kita harus menyusun persamaan elemen yang ada untuk membentuk persamaan matriks dari tiap elemen dengan cara yang tepat agar matriks tersebut dapat mewakili sifat-sifat dari fungsi secara keseluruhan. Pada langkah ini kita dapatkan rumus

$$[\mathbf{K}][\mathbf{T}] = \{\mathbf{f}\} \quad (3.3)$$

dimana  $[\mathbf{K}]$  adalah matriks LHS global yang terdiri dari kumpulan matriks LHS satuan pada tiap elemen seperti pada persamaan (3.1),  $\{\mathbf{f}\}$  adalah *load vector* global yang terdiri dari *load vector* satuan pada tiap elemen seperti pada persamaan (3.2), dan  $[\mathbf{T}]$  adalah vektor global yang tidak diketahui.

### 3.2.5. Menyelesaikan Persamaan Sistem

Setelah mendapatkan persamaan 3.3 maka langkah selanjutnya adalah menghitung persamaan tersebut untuk mendapatkan nilai utama yang ingin dicari, dalam kasus ini adalah suhu dari elemen tersebut. Selanjutnya kita bisa mencari nilai lain yang berhubungan dengan sistem, dalam kasus ini contohnya adalah *heat flux*, dan *heat density*.

### 3.3. Perhitungan Elemen Linier Satu Dimensi

Pada pemodelan elemen linier satu dimensi ini kita misalkan ujung-ujung pada elemen ini dengan '*i*' dan '*j*' dan temperatur pada titik tersebut dengan  $T_i$  dan  $T_j$ . Variasi temperatur pada elemen ini dapat dirumuskan dengan

$$T(x) = \alpha_1 + \alpha_2 x \quad (3.4)$$

dimana  $T$  adalah temperatur pada titik  $x$  dan parameter  $\alpha_1$  dan  $\alpha_2$  adalah konstanta. Karena ada dua konstanta pada persamaan diatas, maka hanya diperlukan dua titik untuk menentukan nilai dari  $\alpha_1$  dan  $\alpha_2$ , yaitu

$$T_i = \alpha_1 + \alpha_2 x_i \quad (3.5)$$

$$T_j = \alpha_1 + \alpha_2 x_j \quad (3.6)$$

Dari persamaan (3.5) dan (3.6) didapat persamaan

$$\alpha_1 = \frac{T_i x_j - T_j x_i}{x_j - x_i} \quad (3.7)$$

$$\alpha_2 = \frac{T_j - T_i}{x_j - x_i} \quad (3.8)$$

Dengan mensubstitusi nilai dari  $\alpha_1$  dan  $\alpha_2$  ke dalam persamaan (3.4) didapatkan

$$T = T_i \left[ \frac{x_j - x}{x_j - x_i} \right] + T_j \left[ \frac{x - x_i}{x_j - x_i} \right] \quad (3.9)$$

atau

$$T = N_i T_i + N_j T_j = [N_i \quad N_j] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$

Dimana  $N_i$  dan  $N_j$  adalah fungsi basis atau fungsi interpolasi, yaitu

$$N_i = \left[ \frac{x_j - x}{x_j - x_i} \right] \quad (3.11)$$

$$N_j = \left[ \frac{x - x_i}{x_j - x_i} \right] \quad (3.12)$$

Persamaan 3. juga dapat dituliskan dengan persamaan

$$T = [N] \{T\} \quad (3.13)$$

Dimana  $[N]$  adalah matriks fungsi bentuk dan  $\{T\}$  adalah vektor dari temperatur yang belum diketahui

$$[N] = [N_i \quad N_j] \quad (3.14)$$

$$\{T\} = \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} \quad (3.15)$$



Dengan bentuk gars yang berbeda maka perumusan yang dilakukan juga menjad berbeda. Perumusan dilakukan dengan mensubstitusikan persamaan (3.10) dengan fungsi dari garis tersebut. Dari persamaan (3.10) maka didapatkan gradien temperatur pada garis

$$\frac{dT}{dx} = \frac{dN_i}{dx} T_i + \frac{dN_j}{dx} T_j = \frac{1}{x_j - x_i} T_i + \frac{1}{x_j - x_i} T_j \quad (3.16)$$

atau

$$\frac{dT}{dx} = \left[ -\frac{1}{l} \quad \frac{1}{l} \right] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \end{Bmatrix} \quad (3.17)$$

Dimana  $l$  adalah panjang dari elemen yang bernilai sama dengan  $(x_j - x_i)$ . Kemudian kita bisa mengamati bahwa gradien temperatur bernilai konstan pada suatu elemen selama temperaturnya linier. Persamaan (3.17) bisa kita sederhanakan menjadi

$$g = [\mathbf{B}][\mathbf{T}] \quad (3.18)$$

dimana  $g$  adalah gradien dari luasan variabel  $T$ ,  $[\mathbf{B}]$  adalah matriks derivatif yang berhubungan dengan gradien dari variabel luasan dengan nilai pada titik, dan  $[\mathbf{T}]$  adalah vektor temperatur.

### 3.4. Perhitungan Elemen Segitiga Dua Dimensi Linier

Pendekatan perhitungan suatu objek dengan elemen segitiga adalah pendekatan yang paling banyak dilakukan untuk perhitungan pada metode FEM. Elemen segitiga dua dimensi linier atau yang biasa disebut dengan *simplex element* dirumuskan dengan

$$T(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 x_y \quad (3.19)$$

dimana bilangan polinomial  $x$  dan  $y$  adalah linier dan memiliki tiga koefisien. Karena segitiga pada gambar 3.2 memiliki tiga titik, maka nilai dari  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  dan  $\alpha_3$  ditentukan dari

$$\begin{aligned} T_i &= \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 x_{yi} \\ T_j &= \alpha_1 + \alpha_2 x_k + \alpha_3 x_{yj} \\ T_k &= \alpha_1 + \alpha_2 x_k + \alpha_3 x_{yk} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Sehingga menghasilkan

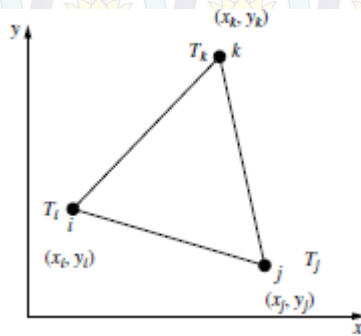
$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \frac{1}{2A} [(x_j y_k - x_k y_j)T_i + (x_k y_i - x_i y_k)T_j + (x_i y_j - x_j y_i)T_k] \\ \alpha_2 &= \frac{1}{2A} [(y_j - y_k)T_i + (y_k - y_i)T_j + (y_i - y_j)T_k] \\ \alpha_3 &= \frac{1}{2A} [(x_k - x_j)T_i + (x_i - x_k)T_j + (x_j - x_k)T_k]\end{aligned}\quad (3.21)$$

Dimana 'A' adalah luasan segitiga yang didapatkan dari

$$2A = \det \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} = (x_i y_j - x_j y_i) + (x_k y_i - x_i y_k) + (x_j y_k - x_k y_j) \quad (3.22)$$

Dengan mensubstitusikan nilai dari  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  dan  $\alpha_3$  kedalam persamaan (3.10) dan menggabungkan koefisien  $T_i$ ,  $T_j$  dan  $T_k$  didapatkan

$$T = N_i T_i + N_j T_j + N_k T_k = \begin{bmatrix} N_i & N_j & N_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} \quad (3.23)$$



**Gambar 3.2** Contoh elemen segitiga linier

Dimana

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{1}{2A}(\alpha_i + b_i x + c_i y) \\ N_j &= \frac{1}{2A}(\alpha_j + b_j x + c_j y) \\ N_k &= \frac{1}{2A}(\alpha_k + b_k x + c_k y) \end{aligned} \quad (3.24)$$

Dan

$$\begin{aligned} \alpha_i &= x_j y_k - x_k y_j ; b_i = y_j - y_k ; c_i = x_k - x_j \\ \alpha_j &= x_k y_i - x_i y_k ; b_j = y_k - y_i ; c_j = x_i - x_k \\ \alpha_k &= x_i y_j - x_j y_i ; b_k = y_i - y_j ; c_k = x_j - x_k \end{aligned} \quad (3.25)$$

Bila kita evaluasi  $N_i$  pada titik  $i$ , pada koordinat  $(x_i, y_i)$  maka kita dapatkan

$$(N_i)_i = \frac{1}{2A}[(x_j y_k - x_k y_j) + (y_j - y_k)(x_i - x_j) + (x_k - x_j)y_i] = \frac{2A}{2A} = 1 \quad (3.26)$$

Dari persamaan diatas dapat kita ketahui bahwa  $(N_j)_i = (N_k)_i = 0$ .

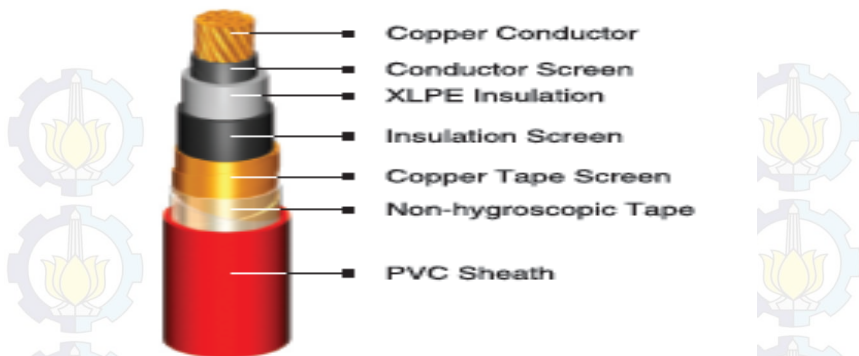
Nilai gradien temperatur  $T$  didapatkan dari

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial N_i}{\partial x} T_i + \frac{\partial N_j}{\partial x} T_j + \frac{\partial N_k}{\partial x} T_k = \frac{b_i}{2A} T_i + \frac{b_j}{2A} T_j + \frac{b_k}{2A} T_k \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial N_i}{\partial y} T_i + \frac{\partial N_j}{\partial y} T_j + \frac{\partial N_k}{\partial y} T_k = \frac{c_i}{2A} T_i + \frac{c_j}{2A} T_j + \frac{c_k}{2A} T_k \quad (3.28)$$

Atau

$$\{g\} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} = [B]\{T\} \quad (3.29)$$



**Gambar 3.3.** Konstruksi Kabel N2XSJ

### 3.5. Kontruksi dan Spesifikasi Kabel Bawah Tanah

Dalam tugas akhir ini, kabel yang akan disimulasikan adalah kabel bawah tanah dengan tipe N2XSJ dengan rating tegangan 20 kV sesuai dengan standart IEC 60502-2. Variasi yang akan dilakukan adalah cara pemasangan kabel di bawah tanah, yaitu dengan pemasangan berjajar, pemasangan *trefoil*, pemasangan berjajar dengan *duct*, dan pemasangan *trefoil* dengan *duct*. Untuk spesifikasi kabel N2XSJ yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.3.

Jenis kabel yang digunakan dalam simulasi ini adalah kabel tipe N2XSJ yang memiliki satu inti konduktor dengan tipe *stranded*. Untuk spesifikasi teknis dapat dilihat pada tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Spesifikasi Kabel N2XSJ

Spesifikasi	Satuan	Nilai
Voltage Class	kV	20
Nom. Cross Section Area	mm <sup>2</sup>	630
Overall Diameter (Approx.)	mm	51.0
Cable Weight (Approx.)	kg/km	6.926
Diameter Konduktor	mm	28.329
Jumlah Konduktor Stranded		61



**Tabel 3.1** Lanjutan

Spesifikasi	Satuan	Nilai
Ketebalan Conductor Screen	mm	1.016
Ketebalan Isolasi XLPE	mm	5.5
Ketebalan Insulation Screen	mm	2.032
Ketebalan Copper Tape Screen	mm	0.127
Ketebalan Non-Hygroscopic Tape	mm	0.66
Ketebalan PVC Sheath	mm	2.5

**Tabel 3.2** Spesifikasi elektrik kabel N2XSY dengan Nom. Cross Section Area 630 mm<sup>2</sup>

Spesifikasi		Satuan	Nilai	
Konduktor		Resistansi DC saat 20° C	Ω/km	0.0283
		Resistansi AC saat 20° C	Ω/km	0.041
Induktansi		Trefoil	mH/km	0.286
		Berjajar	mH/km	0.332
Ampacity saat 30° C	Trefoil	Di Udara	A	1133
		Di Tanah	A	853
	Berjajar	Di Udara	A	1160
		Di Tanah	A	871
Arus Hubung Singkat saat 1 detik		Konduktor	kA	90.09
		Screen	kA	1.14

Pada tabel 3.2 dapat kita lihat data elektrik dari kabel N2XSY dengan *nominal cross section area* 630 mm<sup>2</sup>. Data ini digunakan untuk menghitung panas yang muncul pada konduktor akibat adanya arus yang mengalir.

### 3.6. Material Penyusun Kabel

Material atau bahan penyusun kabel yang digunakan pada simulasi terdiri dari beberapa jenis material yang berbeda dengan spesifikasi yang berbeda. Datasheet material penyusun kabel dapat dilihat pada tabel 3.3

**Tabel 3.3** Datasheet material penyusun kabel

No	Unit	Material				
		Copper	XLPE	EPR	PVC	Polypropylene
1	Epsilon		2.3	2	3.4	2.3
2	Mue	1	1	1	1	1
3	El. Conductivity (S/m)	$5.8 \times 10^7$				200
4	Rho (kg/m <sup>3</sup> )	8930.0	919000	1000	1.46	90600
5	Therm. Conductivity (W/K/m)	401	0.41	0.3	0.16	0.20
6	Heat Cap. (kJ/K/kg)	0.39	2.30274	2.8	0.96	1.92
7	Thermal Diffusivity (m <sup>2</sup> /s)	0.000115141	$1.93742 \times 10^{-10}$	$1.07143 \times 10^{-7}$	0.000114155	$1.1497 \times 10^{-9}$
8	Young's Mod. (Gpa)	120	3	64	3	1.3
9	Poiss.Ratio	0.33	0.2	0.2	0.4	0.42
10	Thermal Exp. ( $\times 10^{-6}$ /K)	17	100	3.3	70	80

### 3.7 Pemodelan Kabel

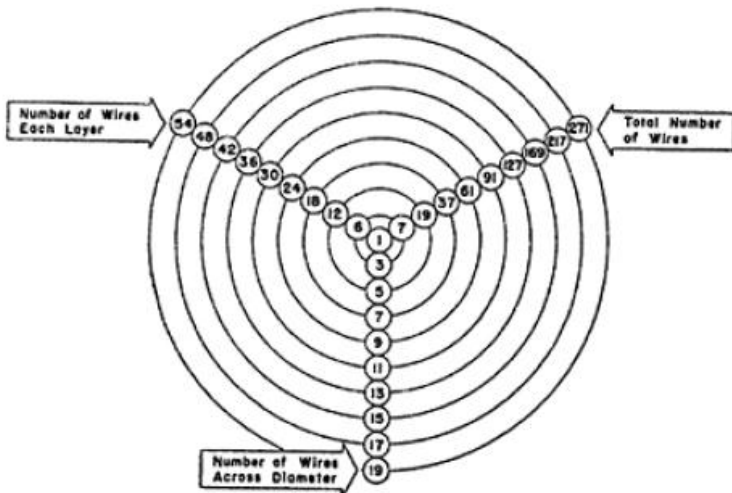
Setelah mendapatkan data-data berupa ketebalan tiap lapisan kabel dan material penyusun kabel, maka kita bisa memodelkan kabel pada aplikasi CST Suite. Pemodelan dilakukan dalam aplikasi *Thermal Solver* pada CST, karena kita ingin melihat kondisi termal pada kabel. Pemodelan dilakukan pada parameter satuan milimeter untuk panjang, luas dan volume, Hertz untuk frekuensi, dan Kelvin untuk suhu.

Pemodelan terlebih dahulu dilakukan dengan memodelkan konduktor yang digunakan. Konduktor yang digunakan adalah tipe *stranded* oleh karena itu perlu diketahui diameter masing-masing serabut. Berdasarkan gambar 3.4 maka bisa dilakukan perhitungan diameter masing-masing serabut. Kabel yang kita gunakan memiliki 5 lapisan serabut, maka berdasarkan gambar 3.4 jumlah serabut yang melintang lurus pada diameter total konduktor adalah 9.

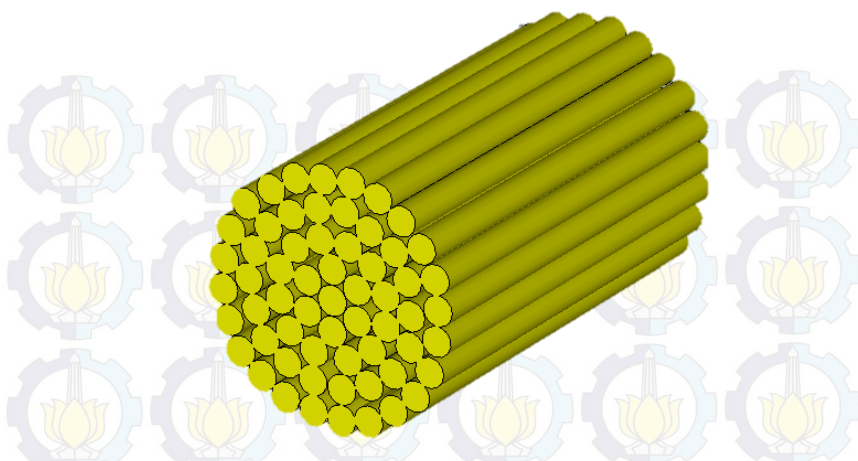
Setelah diketahui jumlah serabut yang melintang adalah 9, maka diameter masing-masing serabut:

Jumlah serabut yang melintang = 9  
 Diameter total konduktor = 28.329  
 Diameter serabut =  $28.329 / 9 = 3.1476$

Setelah kita dapatkan diameter masing-masing serabut, maka kita lakukan penyusunan serabut tersebut berdasarkan gambar 3.4. Berdasarkan gambar tersebut diketahui bahwa jumlah serabut pada kabel ini adalah 61 buah. Maka setelah dilakukan pemodelan didapatkan hasil seperti gambar 3.5.

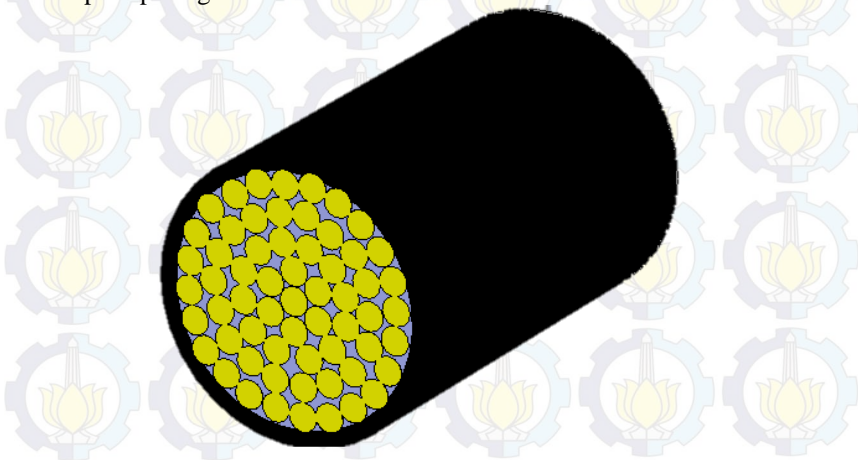


**Gambar 3.4** Perhitungan jumlah serabut pada kabel



**Gambar 3.5** Pemodelan konduktor stranded

Setelah memodelkan konduktor, selanjutnya kita lakukan pemodelan untuk *conductor screen* dan celah udara yang ada di dalam konduktor. Untuk *conductor screen* kita modelkan dengan material *ethyl-propylene rubber*. Sehingga dari hasil pemodelan kita dapatkan seperti pada gambar 3.6.



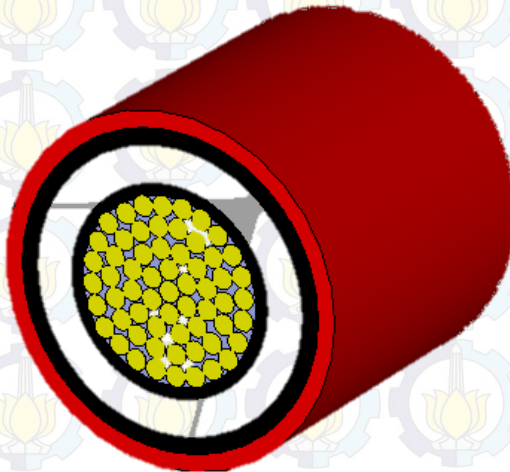
**Gambar 3.6** Pemodelan lapisan *conductor screen* dan udara pada konduktor



Pemodelan selanjutnya adalah memberikan lapisan-lapisan pelindung kabel. Setelah memodelkan *conductor screen*, maka selanjutnya kita memodelkan lapisan isolasi berbahan XLPE yang pada gambar 3.7 berwarna putih. XLPE ini memiliki ketebalan 5,5 mm yang mengelilingi *conductor screen*.

Setelah memodelkan XLPE, selanjutnya kita memodelkan *insulation screen*. *Insulation screen* ini memiliki bahan yang sama dengan *conductor screen* yaitu *ethyl-propylene rubber*. Selanjutnya kabel kita lapiasi lagi dengan *copper tape screen*. *Copper tape screen* ini adalah lapisan kelima dari enam lapisan pelindung kabel. *Copper tape screen* terbuat dari bahan tembaga.

Setelah memodelkan *copper tape screen* selanjutnya kita memodelkan *non-Hygroscopic tape* yang terbuat dari bahan *polypropylene*. Terakhir kita memodelkan lapisan terluar dari kabel yaitu *jacket* dari kabel yang berbahan *polyvinylchloride* atau PVC. Setelah selesai seluruh pemodelan pada kabel maka kita dapatkan hasil seperti pada gambar 3.7.



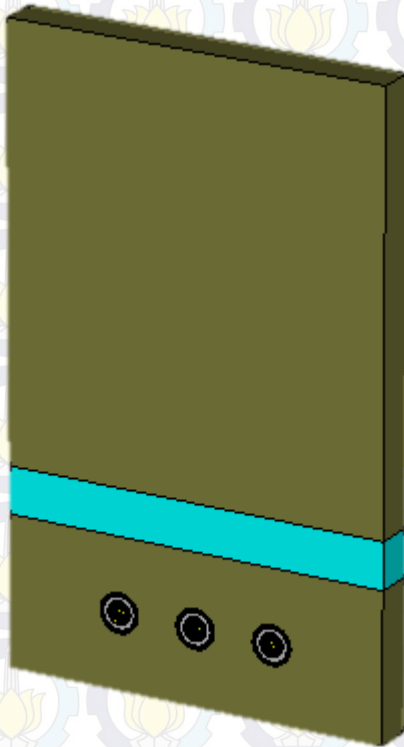
**Gambar 3.6** Pemodelan lengkap kabel N2XS<sub>Y</sub>

### 3.8 Pemodelan Pemasangan Kabel Bawah Tanah

Setelah melakukan pemodelan kabel, langkah selanjutnya adalah memodelkan cara pemasangan kabel di bawah tanah. Pada tugas akhir ini akan menggunakan empat tipe pemasangan, yaitu berjajar, *trefoil*, berjajar dengan menggunakan *duct*, dan *trefoil* dengan menggunakan *duct*. Tiap pemasangan dimodelkan berdasarkan standart IEC 60502-2 dan PUIL.

#### 3.8.1 Pemasangan Berjajar

Tipe pemasangan pertama yang dimodelkan adalah tipe berjajar tanpa menggunakan *duct* atau yang biasa dikenal dengan istilah *direct burial*. Pada tipe ini kabel ditanam dengan kedalaman galian sedalam

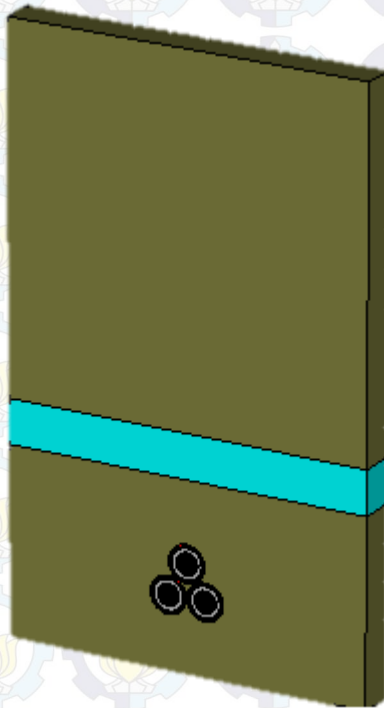


**Gambar 3.7** Pemodelan penanaman kabel bawah tanah dengan metode berjajar langsung

800 milimeter dan lebar 497 milimeter. Pada dasar galian terlebih dahulu diberikan lapisan pasir setinggi 70 milimeter, setelah itu kabel diletakkan diatas pasir tersebut. Kabel diletakkan berjajar dengan jarak satu kali diameter kabel, pada simulasi ini digunakan tiga buah kabel. Setelah kabel diletakkan maka masukkan lagi pasir sampai menutupi kabel setinggi 70 milimeter. Tumpukan pasir berisi kabel tersebut kemudian ditutup dengan beton setebal 60 milimeter. Setelah itu seluruh lapisan ditutup kembali dengan tanah urukan. Hasil pemodelan penanaman kabel pada CST Suite dapat dilihat pada gambar 3.7

### 3.8.2 Pemasangan *Trefoil*

Tipe pemasangan selanjutnya adalah tipe *trefoil* tanpa menggunakan *duct* atau yang biasa dikenal dengan istilah *direct burial*. Pada tipe ini kabel ditanam dengan kedalaman galian sedalam 800 milimeter dan

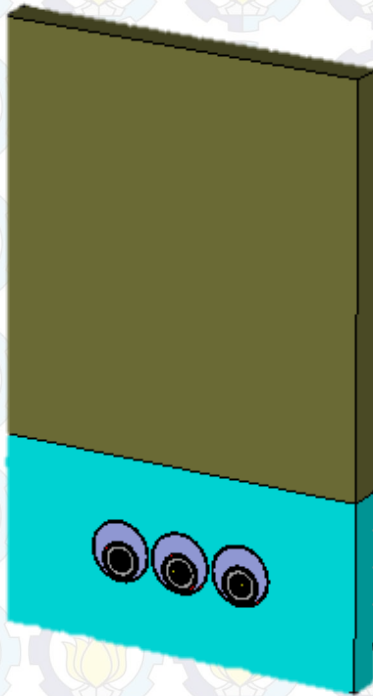


**Gambar 3.8** Pemodelan penanaman kabel bawah tanah dengan metode *trefoil* langsung

lebar 497 milimeter. Pada dasar galian terlebih dahulu diberikan lapisan pasir setinggi 70 milimeter, setelah itu kabel diletakkan diatas pasir tersebut. Kabel diletakkan dengan susunan berbentuk segitiga seperti pada gambar 3.8. Setelah kabel diletakkan maka masukkan lagi pasir sampai menutupi kabel setinggi 70 milimeter. Tumpukan pasir berisi kabel tersebut kemudian ditutup dengan beton setebal 60 milimeter. Setelah itu seluruh lapisan ditutup kembali dengan tanah urukan. Hasil pemodelan penanaman kabel pada CST Suite dapat dilihat pada gambar 3.8

### 3.8.3 Pemasangan Berjajar dengan *Duct*

Tipe pemasangan selanjutnya adalah pemasangan berjajar dengan *duct*. Pada tipe ini kabel ditanam dengan kedalaman galian sedalam 800



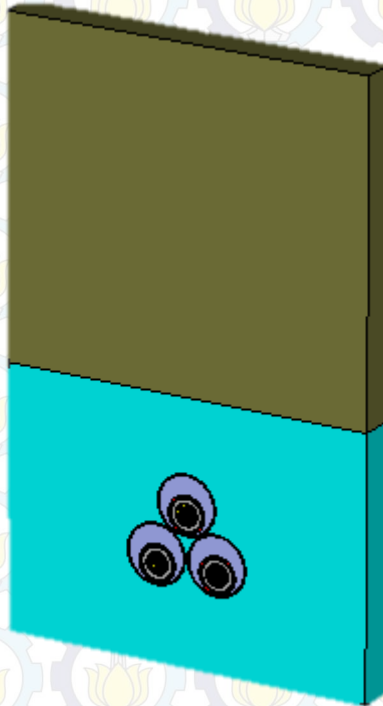
**Gambar 3.9** Pemodelan penanaman kabel bawah tanah dengan metode berjajar dengan *duct*



milimeter dan lebar 497 milimeter. Pada dasar galian dipasang beton yang sudah dilubangi dengan *duct* yang terbuat dari bahan PVC. Kabel diletakkan di dalam *duct* PVC yang ada pada beton, masing-masing lubang diisi oleh satu kabel. Tinggi dari beton ini sekitar 250 milimeter, dan jarak dari dasar beton sampai ke lubang *duct* adalah 70 milimeter. Setelah itu seluruh lapisan ditutup kembali dengan tanah urukan. Hasil pemodelan penanaman kabel pada CST Suite dapat dilihat pada gambar 3.9.

#### **3.8.4 Pemasangan Trefoil dengan Duct**

Tipe pemasangan selanjutnya adalah pemasangan *trefoil* dengan *duct*. Pada tipe ini kabel ditanam dengan kedalaman galian



**Gambar 3.10** Pemodelan penanaman kabel bawah tanah dengan metode *trefoil* dengan *duct*

sedalam 800 milimeter dan lebar 497 milimeter. Pada dasar galian dipasang beton yang sudah dilubangi dengan *duct* yang terbuat dari bahan PVC. Lubang pada beton dibuat berbentuk segitiga atau *trefoil* seperti pada gambar 3.10. Kabel diletakkan di dalam *duct* PVC yang ada pada beton, masing-masing lubang diisi oleh satu kabel. Tinggi dari beton ini sekitar 250 milimeter, dan jarak dari dasar beton sampai ke lubang *duct* adalah 70 milimeter. Setelah itu seluruh lapisan ditutup kembali dengan tanah urukan. Hasil pemodelan penanaman kabel pada CST Suite dapat dilihat pada gambar 3.10.

## BAB IV

### HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA

Pada bab ini akan dipaparkan hasil simulasi serta analisis hasil simulasi. Hal ini dilakukan dengan tujuan mengetahui pengaruh susunan pemasangan kabel bawah tanah terhadap temperatur kabel dan tanah disekitarnya. Perbandingan juga dilakukan dengan beberapa parameter yang mungkin terjadi pada kondisi sebenarnya

#### 4.1 Tegangan, Arus dan Volume Heat pada Kabel

Kabel yang dijadikan sebagai pemodelan adalah kabel N2XSY 20 kV dengan arus sistem adalah 1732,052 Ampere. Karena pada pemodelan digunakan tiga buah kabel, maka arus pada masing-masing kabel adalah 577,35 Ampere.

Pada CST Studio Suite ini, untuk pemodelan *thermal solver* data yang dimasukkan berupa *volume heat*, sehingga terlebih dahulu kita lakukan konversi dari arus ke *volume heat*. Perhitungan *volume heat* dilakukan dengan mencari nilai dari  $R'$  yang merupakan resistansi DC konduktor berdasarkan rumus

$$R' = \frac{1.02 \times 10^6 \times \rho_{20}}{S} [1 + \alpha_{20}(\theta - 20)] \quad (4.1)$$

dimana  $\alpha_{20}$  adalah koefisien temperatur,  $\theta$  adalah temperatur konduktor dan  $\rho_{20}$  adalah resistansi pada suhu 20°C. Setelah mendapatkan nilai  $R'$  maka selanjutnya adalah menghitung nilai  $R$  yaitu resistansi AC dari konduktor. Nilai  $R$  didapatkan dari rumus 4.2.

$$R = R'(1 + y_s + y_p) \quad (4.2)$$

dimana  $y_s$  adalah *skin effect factor* dan  $y_p$  adalah *proximity effect factor*.

Setelah mendapatkan nilai dari  $R$  maka selanjutnya kita mencari nilai dari  $W_c$  yang merupakan rugi-rugi konduktor per satuan panjang yang didapatkan dari rumus

$$W_c = I^2 R \quad (4.3)$$

Perhitungan selanjutnya adalah mencari nilai dari  $W_d$  yang merupakan rugi-rugi dielektris per fasa yang didapatkan dari persamaan

$$W_d = 2\pi f C (V_{LN})^2 \tan \delta \quad (4.4)$$

dimana  $\tan \delta$  adalah faktor rugi-rugi dari bahan isolasi kabel,  $f$  adalah frekuensi sistem, dan  $C$  didapatkan dari persamaan

$$C = \frac{\epsilon}{18 \ln \left( \frac{D_i}{dc} \right)} \times 10^{-9} \quad (4.5)$$

dimana  $\epsilon$  adalah *relative permittivity* dari bahan isolasi kabel,  $D_i$  adalah diameter total kabel dan  $dc$  adalah diameter konduktor.

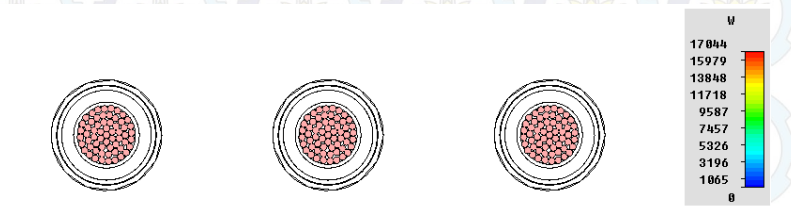
Setelah mendapatkan nilai dari  $W_d$  dan  $W_c$  maka selanjutnya adalah mencari nilai  $W_t$  yang merupakan total daya terdisipasi pada kabel.  $W_t$  didapatkan dari penjumlahan  $W_d$  dan  $W_c$ . Setelah mendapat nilai  $W_t$  maka bisa kita dapatkan nilai *volume heat* atau  $H$  yang didapatkan dari persamaan

$$H = \frac{W_t}{S} \quad (4.6)$$

dimana  $S$  adalah *cross section area* dari konduktor.

Berdasarkan perhitungan, maka untuk arus 577,35 Ampere *volume heat*-nya sebesar 17043,39 W/m<sup>3</sup>. Untuk contoh pemodelan *volume heat* pada pemodelan ini dapat dilihat pada gambar 4.1. Pada tiap pemodelan *volume heat* seluruh kabel bernilai sama.

Pada gambar 4.1, *volume heat* pada kabel dimodelkan berada pada konduktor yang ditandai dengan warna merah. Pada pemodelan ini sumber *volume heat* lain seperti pada lapisan metalik kabel diabaikan karena nilainya sangat kecil.



**Gambar 4.1** Contoh pemodelan *volume heat* pada kabel



## 4.2 Perbandingan Temperatur pada Pemasangan Kabel Berjajar dan *Trefoil*

Pada pembahasan ini akan dilakukan perbandingan temperatur pada pemasangan kabel secara berjajar dan *trefoil*. Temperatur yang dibandingkan adalah temperatur pada kabel dan temperatur pada tanah di sekitarnya. Sebelum membandingkan hasil dari kedua jenis pemasangan, terlebih dahulu dibahas tentang hasil dari masing-masing pemasangan.

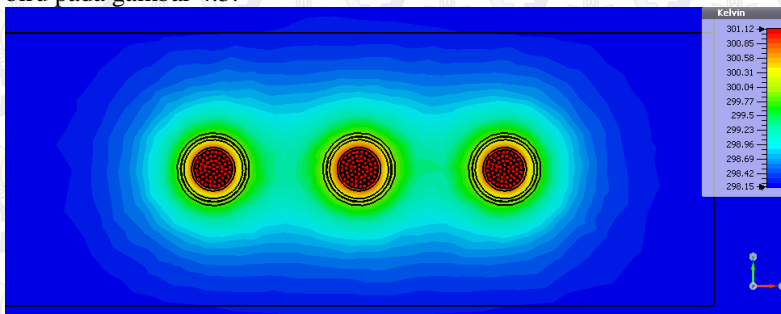
### 4.2.1 Hasil Simulasi pada Pemasangan Berjajar

Pada simulasi ini kita akan menganalisa kondisi temperatur pada pemasangan kabel secara berjajar. Pada pemasangan ini kondisi pasir pada daerah di sekitar kabel adalah kering.

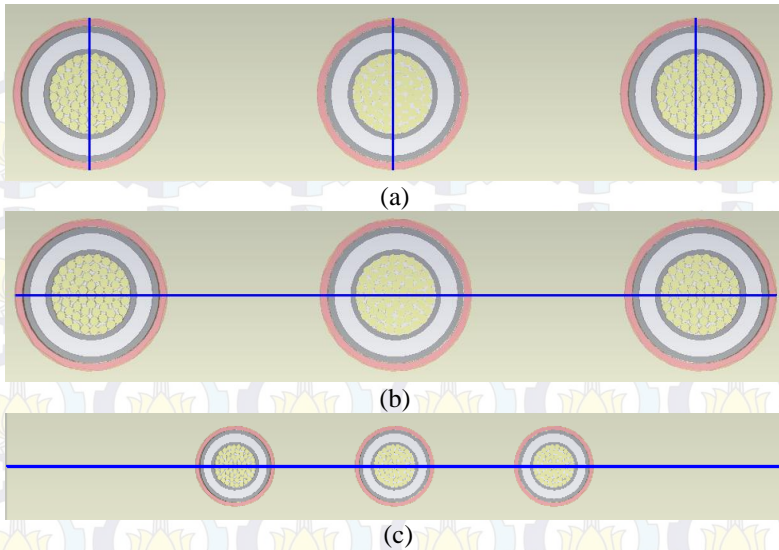
Hasil simulasi pada pemasangan berjajar dapat kita lihat pada gambar 4.2. Pada gambar 4.2 dapat kita lihat bahwa kenaikan temperatur pada daerah disekitar kabel tidak terlalu signifikan. Kenaikan temperatur pada daerah di sekitar kabel bahkan tidak sampai keluar dari daerah galian yang ditandai oleh garis hitam. Pada pemasangan ini juga kita dapat lihat bahwa pemasangan ini hanya berpengaruh sangat kecil pada perubahan temperatur yang terjadi pada beton penutup kabel.

Untuk hasil yang lebih jelas maka kita tarik kurva untuk menampilkan grafik sehingga kita bisa mengetahui nilai temperatur pada daerah yang akan kita analisa.

Pada gambar 4.3 dapat kita lihat kurva-kurva yang ditarik untuk mendapatkan grafik. Kurva yang ditarik ditandai dengan warna biru pada gambar 4.3.



**Gambar 4.2** Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel berjajar

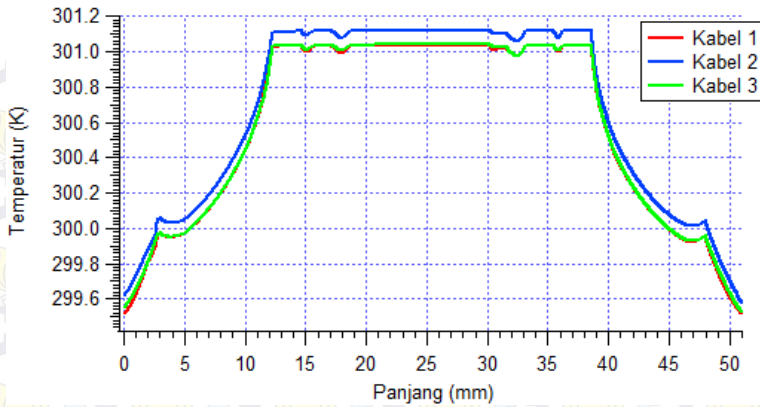


**Gambar 4.3** Penarikan kurva untuk mendapatkan grafik (a) pada kabel (b) antar kabel (c) horizontal

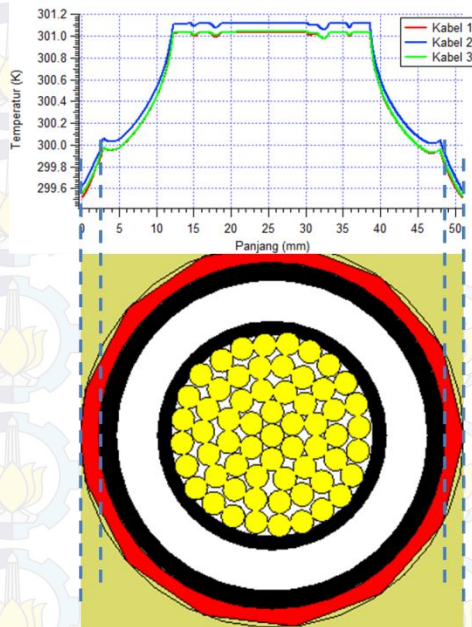
Pada gambar 4.3 dapat kita lihat terdapat tiga kelompok penarikan kurva. Kelompok pertama (a) adalah kurva yang ditarik untuk mengetahui kondisi temperatur pada tiap kabel. Kelompok kedua (b) adalah kurva yang ditarik untuk mengetahui kondisi temperatur diantara ketiga kabel. Kelompok ketiga (c) adalah kurva yang ditarik untuk mengetahui persebaran pana secara horizontal pada daerah urukan tanah.

#### **4.2.1.1 Temperatur pada Kabel**

Pada subbab ini akan dibahas mengenai kondisi temperatur pada tiap kabel. Sebelumnya perlu diketahui bahwa penamaan kabel, yaitu kabel 1, kabel 2, dan kabel 3 adalah berdasarkan pada posisi kabel pada gambar 4.3. Urutan penamaan kabel berurutan dari kiri ke kanan adalah kabel 1, kabel 2, dan kabel 3.



**Gambar 4.4** Grafik perbandingan temperatur pada tiap kabel



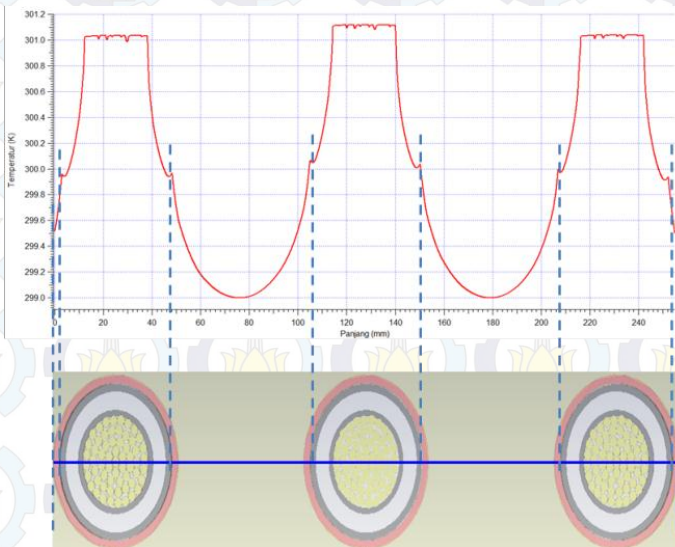
**Gambar 4.5** Analisa grafik terhadap kabel

Pada gambar 4.4 dapat kita lihat perbandingan temperatur pada tiap kabel. Kondisi yang terlihat mencolok pada gambar 4.4 adalah pada kabel 2, dimana temperatur pada kabel tersebut lebih tinggi dari kedua kabel lainnya yaitu sekitar 301,1 K. Sedangkan untuk kabel 1 dan kabel 3 temperaturnya cenderung sama, yaitu 301,02 K walaupun kabel 3 temperaturnya sedikit lebih tinggi dari kabel 1.

Pada gambar 4.5 dapat kita lihat bahwa terjadi kenaikan pada grafik yang terjadi pada bagian diantara lapisan PVC dan *copper tape screen*. Diantara kedua lapisan itu terdapat sebuah *non-hygroscopic tape* yang berfungsi untuk mencegah air masuk ke dalam kabel. Terjadi kenaikan ini disebabkan oleh sifat dari bahan ini yang memiliki *thermal conductivity* dan *heat capacity* yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan bahan isolasi kabel lainnya.

#### 4.2.1.2 Temperatur Antar Kabel

Pada subbab ini akan dibahas mengenai kondisi temperatur diantara ketiga kabel. Analisa dilakukan untuk mengetahui temperatur diantara kabel yang akan digunakan untuk menghitung kemampuan hantaran arus pada kabel bawah tanah.



**Gambar 4.6** Grafik temperatur antar kabel

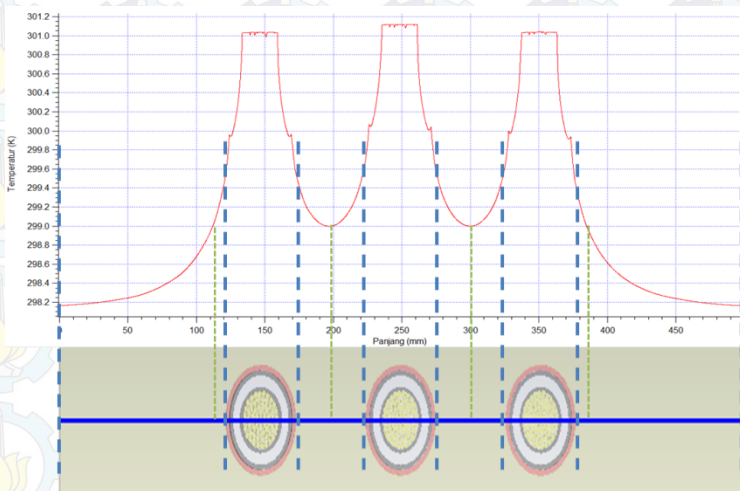


Pada gambar 4.6 dapat kita lihat bahwa temperatur diantara kabel, baik antara kabel 1 dan kabel 2, maupun kabel 2 ke kabel 3 memiliki temperatur yang cenderung sama. Menurunnya nilai pada grafik menunjukkan penurunan dalam selang yang sama. Meskipun dalam grafik terlihat temperatur pada daerah di sekitar kabel rendah, akan tetapi sebenarnya temperatur pada tanah diantara kabel mengalami kenaikan. Pada mulanya temperatur tanah adalah 298,15 K, akan tetapi setelah kabel dioperasikan pada kondisi yang dijelaskan pada bab 4.1, maka terjadi kenaikan sampai 299,6 K untuk daerah yang paling dekat dengan kabel.

#### 4.2.1.3 Persebaran Panas Secara Horizontal

Pada subbab ini akan dibahas mengenai kondisi temperatur diantara ketiga kabel. Analisa dilakukan untuk mengetahui temperatur diantara kabel yang akan digunakan untuk menghitung kemampuan hantaran arus pada kabel bawah tanah.

Pada gambar 4.7 menampilkan efek temperatur kabel terhadap luasan tanah urukan secara horizontal. Dari gambar 4.7 dapat kita analisa bahwa temperatur pada tanah di bagian luar kabel lebih rendah daripada yang berada diantara ketiga kabel.



**Gambar 4.7** Grafik temperatur di sekitar kabel secara horizontal

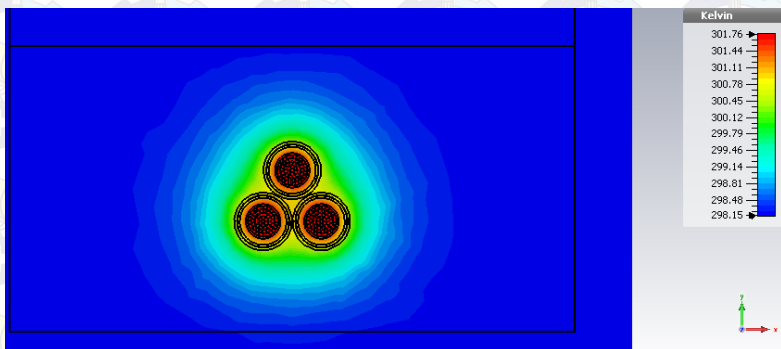
Dapat kita lihat garis putus-putus yang berwarna hijau pada gambar 4.7 menunjukkan daerah yang bertemperatur 299 K. Pada garis putus-putus hijau yang berada di luar, untuk mencapai temperatur 299 K hanya dibutuhkan jarak kurang lebih 10 mm. Sedangkan untuk garis putus-putus yang berada diantara kabel dibutuhkan jarak sekitar 21 mm. Hal ini diakibatkan karena tanah yang berada diantara kabel terkena panas dari kabel disebelahnya. Secara horizontal juga dapat kita lihat bahwa panas dari kabel mempengaruhi temperatur tanah di sekitarnya kurang lebih 12 mm dari masing-masing pinggir galian tanah.

#### 4.2.2 Hasil Simulasi pada Pemasangan *Trefoil*

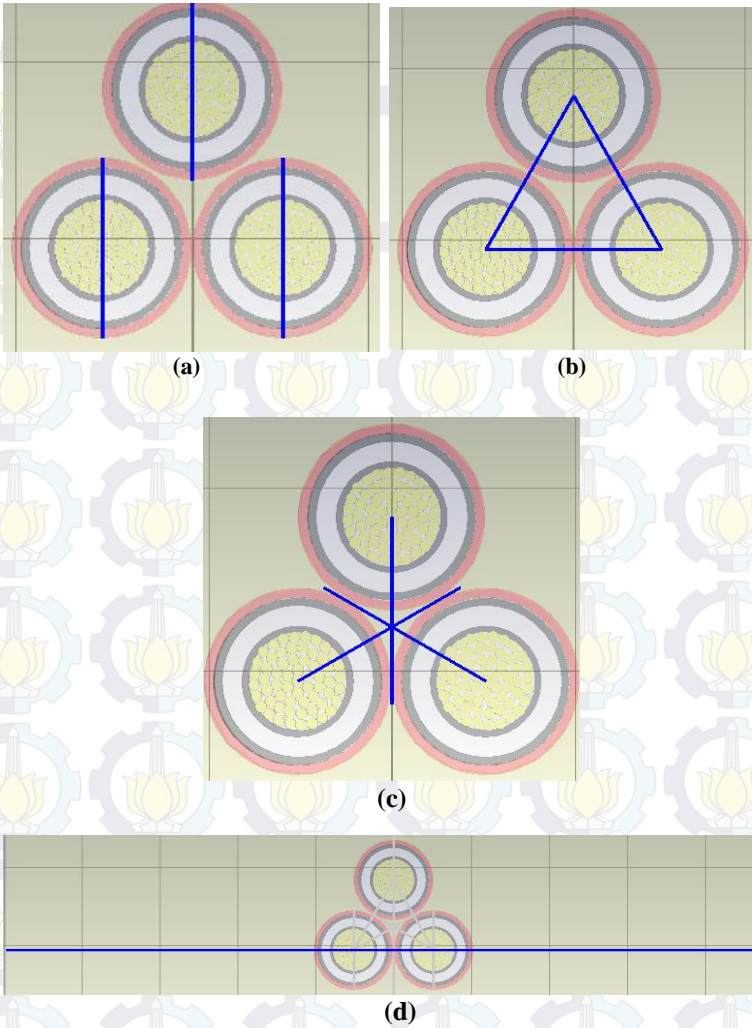
Pada simulasi ini kita akan menganalisa kondisi temperatur pada pemasangan kabel secara *trefoil*. Pada pemasangan ini kondisi pasir pada daerah di sekitar kabel adalah kering.

Hasil simulasi pada pemasangan *trefoil* dapat kita lihat pada gambar 4.8. Pada gambar 4.8 dapat kita lihat bahwa kenaikan temperatur pada daerah disekitar kabel tidak terlalu signifikan. Kenaikan temperatur pada daerah di sekitar kabel bahkan tidak sampai keluar dari daerah galian yang ditandai oleh garis hitam. Pada pemasangan ini juga kita dapat lihat bahwa pemasangan ini hanya berpengaruh sangat kecil pada perubahan temperatur yang terjadi pada beton penutup kabel.

Untuk hasil yang lebih jelas maka kita tarik kurva untuk menampilkan grafik sehingga kita bisa mengetahui nilai temperatur pada daerah yang akan kita analisa.



**Gambar 4.8** Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel *trefoil*



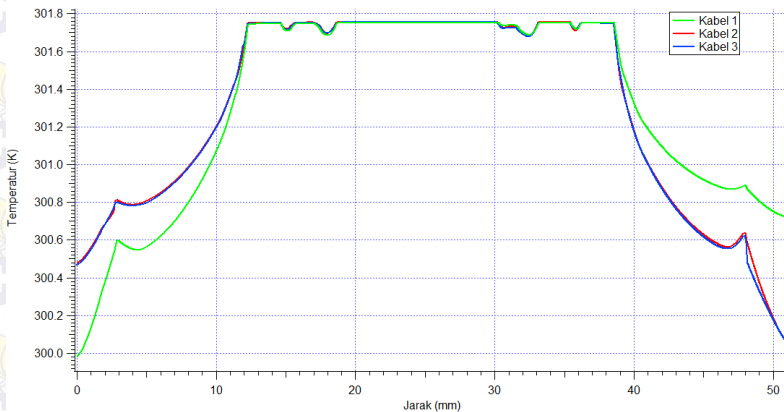
**Gambar 4.9** Penarikan kurva untuk mendapatkan grafik (a) pada kabel (b) antar konduktor (c) diantara kabel (d) horizontal

Pada gambar 4.9 dapat kita lihat kurva-kurva yang ditarik untuk mendapatkan grafik. Kurva yang ditarik ditandai dengan warna biru pada gambar 4.9.

Pada gambar 4.9 dapat kita lihat terdapat tiga kelompok penarikan kurva. Kelompok pertama (a) adalah kurva yang ditarik untuk mengetahui kondisi temperatur pada tiap kabel. Kelompok kedua (b) adalah kurva yang ditarik untuk mengetahui kondisi temperatur diantara dua konduktor kabel. Kelompok ketiga (c) adalah kurva yang ditarik untuk mengetahui kondisi temperatur diantara ketiga kabel. Kelompok keempat (d) adalah kurva yang ditarik untuk mengetahui persebaran panas secara horizontal pada daerah urukan tanah

#### 4.2.2.1 Temperatur pada Kabel

Pada subbab ini akan dibahas mengenai kondisi temperatur pada tiap kabel. Sebelumnya perlu diketahui bahwa penamaan kabel, yaitu kabel 1, kabel 2, dan kabel 3 adalah berdasarkan pada posisi kabel pada gambar 4.3. Kabel 1 adalah kabel yang berada di atas, kabel 2 adalah kabel yang berada di bawah sebelah kanan, dan kabel 3 adalah kabel yang berada di bawah sebelah kiri. Grafik ditarik pada tiap kabel dari bagian atas ke bagian bawah kabel.



**Gambar 4.10** Grafik perbandingan temperatur pada tiap kabel

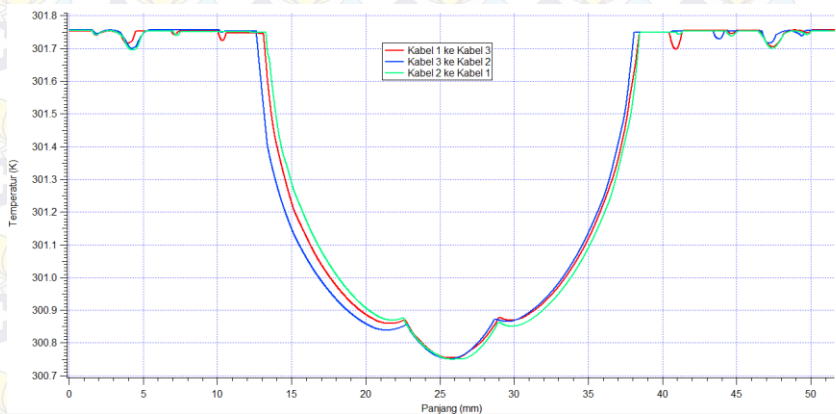


Pada gambar 4.10 dapat kita lihat perbandingan temperatur pada tiap kabel. Pada gambar 4.10 dapat kita lihat bahwa temperatur pada tiap konduktor kurang lebih menunjukkan nilai yang sama. Pada gambar 4.10 yang menarik adalah kondisi atas kabel dan bawah kabel yang ditunjukkan oleh bagian awal dan akhir grafik.

Pada bagian awal grafik kita bisa lihat bahwa temperatur pada kabel 1 lebih rendah dibandingkan dengan kabel 2 dan kabel 3. Hal ini disebabkan karena pada kabel 1 temperaturnya tidak dipengaruhi oleh temperatur 2 kabel lainnya. Sedangkan pada kabel 2 dan 3 dibagian atasnya terpengaruh oleh 2 kabel lainnya.

Pada bagian akhir grafik dapat kita lihat bahwa kondisinya berkebalikkan dengan bagian awal grafik. Pada kabel 2 dan kabel 3 temperaturnya lebih rendah bila dibandingkan dengan kabel 1. Hal ini disebabkan karena bagian bawah dari kabel 2 dan kabel 3 tidak terpengaruh oleh kedua kabel lainnya. Nilai temperatur pada akhir bagian kabel 1 nilainya lebih tinggi bila dibandingkan dengan nilai pada kabel 2 dan kabel 3 di bagian awal grafik. Hal ini disebabkan karena letak kabel 1 yang berada di antara kabel 2 dan kabel 3. Kabel 2 dan kabel 3 letaknya berada di pinggir sehingga pengaruhnya lebih kecil.

Pada bagian tengah grafik, yaitu bagian yang menunjukkan konduktor ketiga kabel menunjukkan temperatur yang sama, yaitu 301,76 K.



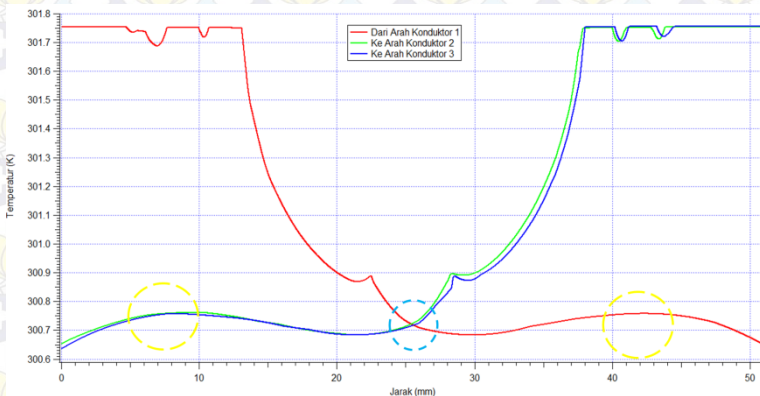
**Gambar 4.11** Grafik perbandingan temperatur diantara 2 konduktor

#### 4.2.2.2 Temperatur Diantara Konduktor

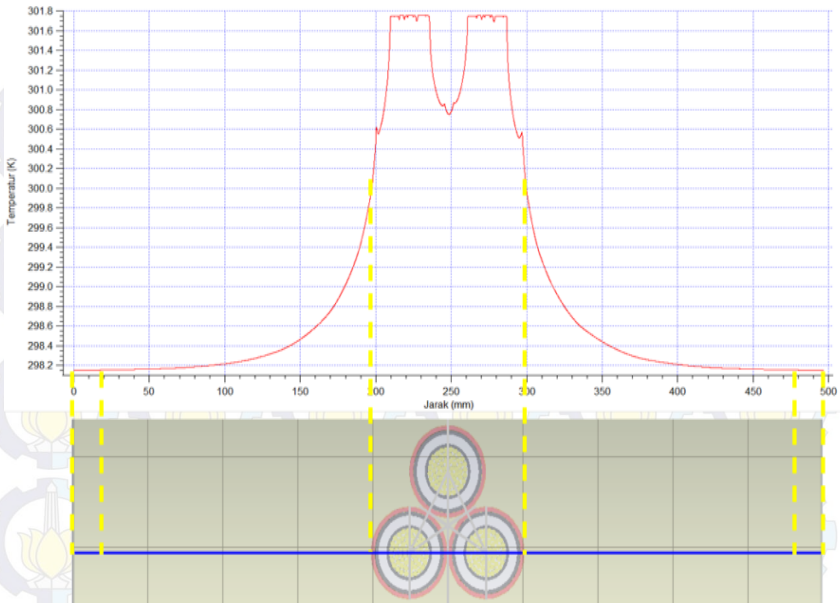
Berdasarkan pengambilan kurva seperti pada gambar 4.9 (b), maka pada gambar 4.11 dapat kita lihat perbandingan temperatur diantara dua kabel. Dapat kita lihat bahwa diantara kedua konduktor terjadi penurunan temperatur yang cenderung sama. Akan tetapi temperatur pada daerah diantara dua buah kabel ini sebenarnya sangat tinggi, yaitu mencapai 300,75 K.

Gambar 4.12 menunjukkan kondisi temperatur pada daerah pengambilan kurva seperti pada gambar 4.9 (c). Kurva ditarik dari tengah masing-masing konduktor kabel sejauh diameter kabel yaitu 51 mm ke daerah diantara dua kabel lainnya. Untuk mengetahui nilai temperatur pada perpotongan ketiga kurva yang ditarik, maka arah penarikan kurva pada kabel 2 dan kabel 3 dilakukan dengan arah sebaliknya dari kabel 1.

Pada gambar 4.12 dapat kita lihat bahwa grafik temperatur pada tiap penarikan kurva menunjukkan karakteristik yang sama. Kemudian dapat kita lihat pula pada lingkaran putus-putus berwarna biru yang menunjukkan titik pertemuan ketiga kurva temperatur pada titik tersebut adalah 300,73 K. Kemudian pada lingkaran putus-putus berwarna kuning dapat kita lihat terjadi sedikit kenaikan temperatur. Kenaikan tersebut terjadi ketika garis berada tepat diantara dua buah kabel dimana temperaturnya mencapai 300,75 K.



**Gambar 4.12** Grafik perbandingan temperatur diantara 3 kabel



**Gambar 4.13** Grafik temperatur di sekitar kabel secara horizontal

#### 4.2.2.3 Persebaran Panas Secara Horizontal

Pada subbab ini akan dibahas mengenai kondisi temperatur secara horizontal. Kurva ditarik secara horizontal sejajar dengan dua kabel yang berada di bagian bawah. Alasan pemilihan posisi tersebut diambil karena pada bagian tersebut secara teori temperaturnya secara horizontal akan lebih tinggi dibandingkan pada titik lain. Data temperatur diantara kabel akan digunakan untuk menghitung kemampuan hantaran arus pada kabel bawah tanah.

Pada gambar 4.13 dapat kita lihat secara horizontal bahwa pengaruh temperatur kabel pada tanah di sekitar lebih tinggi bila dibandingkan dengan pemasangan berjajar. Pada pemasangan berjajar dapat kita lihat untuk mencapai temperatur 290 K dibutuhkan jarak 10 mm dari bagian terluar kabel, sementara pada pemasangan *trefoil* ini dibutuhkan jarak sekitar 18 mm dari bagian terluar kabel. Pada pemasangan ini juga dapat kita lihat bahwa temperatur pada tepi urukan tanah sejauh 15 mm tidak terpengaruh oleh temperatur kabel, atau bisa dikatakan tidak terjadi kenaikan temperatur.

#### 4.2.3 Perbandingan Pemasangan Berjajar dan *Trefoil*

Pada subbab ini akan dibahas mengenai perbandingan antara dua jenis pemasangan, yaitu pemasangan berjajar dan pemasangan *trefoil*. Kedua pemasangan dilakukan dalam kondisi tanah yang kering. Perbandingan yang akan dilakukan yaitu perbandingan temperatur konduktor dan perbandingan *ampacity* kabel.

##### 4.2.3.1 Perbandingan Temperatur Konduktor

Berdasarkan subbab 4.2.1.1 dan 4.2.2.1 maka dapat kita ambil nilai temperatur konduktor pada pemasangan berjajar dan pemasangan *trefoil*. Temperatur pada konduktor dibutuhkan untuk menghitung *ampacity* pada kabel.

Untuk lebih jelas mengenai temperatur konduktor pada tiap pemasangan dapat kita lihat pada tabel 4.1. Untuk urutan penamaan kabel dapat dilihat pada subbab 4.2.1.1 dan 4.2.2.1.

**Tabel 4.1** Temperatur Konduktor pada Tiap Pemasangan

Penamaan Kabel	Temperatur (K)	
	Berjajar	Trefoil
Kabel 1	301,02	301,76
Kabel 2	301,1	301,76
Kabel 3	301,02	301,76

Dari tabel 4.1 dapat kita analisa bahwa temperatur tiap konduktor pada pemasangan *trefoil* lebih tinggi bila dibandingkan dengan pemasangan berjajar. Hal ini disebabkan karena jarak antar kabel yang lebih dekat.

Pada pemasangan berjajar hasilnya cukup menarik, karena temperatur kabel yang berada di tengah, yaitu kabel 2 nilainya lebih tinggi dari dua kabel lainnya. Hal ini disebabkan karena kabel 2 terpengaruh oleh temperatur dua kabel yang menghimpitnya.

Dari hasil ini dapat kita simpulkan bahwa pemasangan berjajar memiliki disipasi panas yang lebih baik, akan tetapi dengan adanya satu kabel yang memiliki temperatur lebih tinggi, maka kabel tersebut akan mengalami *derating* yang lebih besar bila dibandingkan dengan dua kabel lainnya. Sedangkan pada pemasangan *trefoil* karena temperatur pada tiap kabel besarnya sama, maka saat mengalami *derating* besarnya akan cenderung sama.



#### 4.2.3.2 Perbandingan *Ampacity* Kabel

Setelah mengetahui temperatur konduktor pada tiap pemasangan maka langkah selanjutnya adalah membandingkan *ampacity* pada tiap pemasangan. Untuk perhitungan *ampacity* didapatkan berdasarkan persamaan dari standar IEC 60287.

$$I = \sqrt{\frac{T_c - T_a}{R_{dc} \cdot R_{ca}}} \quad (4.7)$$

dimana

$I$  = Ampacity (A)

$T_c$  = Temperatur konduktor ( $^{\circ}\text{C}$ )

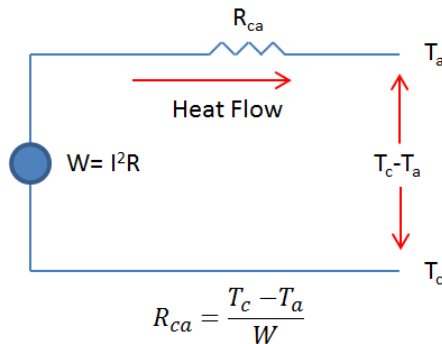
$T_a$  = Temperatur tanah sekitar ( $^{\circ}\text{C}$ )

$R_{dc}$  = Resistansi DC konduktor ( $\Omega/\text{m}$ )

$R_{ca}$  = Resistansi termal antara konduktor dan tanah ( $\text{K.m/W}$ )

Untuk perhitungan resistansi termal didapatkan berdasarkan skema pada gambar 4.15 dan untuk nilai dari resistansi DC konduktor didapatkan dari datasheet kabel, yaitu sebesar  $0.0283 \Omega/\text{km}$  atau  $2.83 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$ .

Untuk menghitung resistansi termal maka dibutuhkan data temperatur tanah disekitar kabel. Jarak yang dipakai untuk mengetahui temperatur tanah dari kabel pada tugas akhir ini adalah 10 mm dari tepi masing-masing kabel. Karena pada pemasangan berjajar nilai temperatur pada satu sisi dengan sisi lainnya berbeda, maka diambil nilai



**Gambar 4.14** Skema perhitungan resistansi termal

tengahnya. Untuk lebih jelasnya nilai temperatur dapat dilihat pada tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Temperatur tanah di sekitar kabel pada pemasangan berjajar

Penamaan Berjajar	Temperatur (K)		
	Sisi Kiri	Sisi Kanan	Nilai Rata-rata
Kabel 1	298,97	299,1	299,035
Kabel 2	299,15	299,15	299,15
Kabel 3	299,1	298,9	299

Kemudian untuk temperatur konduktor pada pemasangan *trefoil* juga kita tarik 10 mm pada masing-masing kabel. Untuk pemasangan ini karena jarak ketiga kabelnya yang rapat, maka temperatur diambil 10 mm disisi luar kabel saja. Pada pemasangan ini ternyata temperatur pada tanah disekitar kabel besarnya sama yaitu 299,7 K.

Setelah mendapatkan nilai temperatur pada tanah disekitar kabel maka langkah selanjutnya adalah menentukan resistansi termal dari masing-masing kabel. Berdasarkan gambar 4.14 maka didapatkan rumus

$$R_{ca} = \frac{T_c - T_a}{W} \quad (4.8)$$

Dengan nilai W pada tiap kabel sama, yaitu 10,737 W/m dan temperatur diubah kedalam satuan °C maka berdasarkan rumus 4.2 maka didapatkan hasil resistansi termal dari tiap kabel ke tanah seperti pada tabel 4.3.

**Tabel 4.3** Resistansi Termal pada Tiap Pemasangan

Penamaan Kabel	Resistansi Termal ( m.K/W)	
	Berjajar	Trefoil
Kabel 1	0,185	0,192
Kabel 2	0,182	0,192
Kabel 3	0,188	0,192

Setelah mendapatkan nilai temperatur dari konduktor, tanah sekitar, dan resistansi termal, maka dapat kita hitung *ampacity* kabel. Berdasarkan rumus 4.1 maka didapatkan hasil seperti pada tabel 4.4.

**Tabel 4.4** *Ampacity* pada Tiap Pemasangan

Penamaan Kabel	Ampacity (A)	
	Berjajar	Trefoil
Kabel 1	615,745	615,729
Kabel 2	615,302	615,729
Kabel 3	616,174	615,729

Dari tabel 4.4 maka dapat kita analisa beberapa hal, yaitu pada pemasangan *trefoil* akan menghasilkan kemampuan hantar arus atau *ampacity* yang seragam bila dibandingkan dengan pemasangan berjajar, dan *ampacity*-nya lebih kecil bila dibandingkan dengan kabel 1 dan kabel 3 pada pemasangan berjajar.

Pada pemasangan berjajar, *ampacity* pada tiap kabel nilainya berbeda. Kabel 2 memiliki *ampacity* yang paling rendah, hal ini disebabkan karena tingginya temperatur pada kabel akibat dari temperatur dua kabel lain yang menghimpit kabel 2.

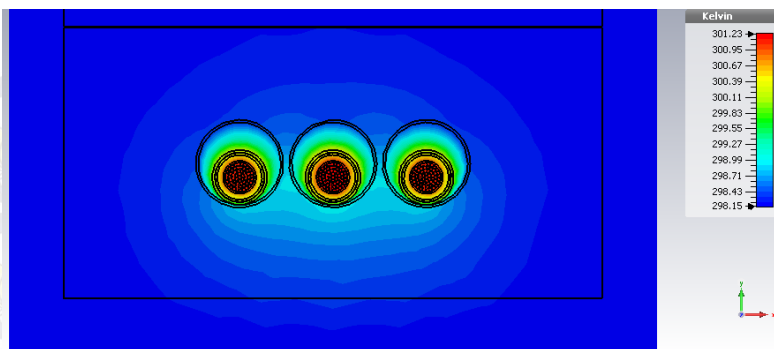
#### **4.3 Perbandingan Temperatur pada Pemasangan Kabel Berjajar dengan Duct dan Berjajar Tanpa Duct**

Pada pembahasan ini akan dilakukan perbandingan temperatur pada pemasangan kabel secara berjajar dengan *duct* dan *trefoil* dengan *duct*. Temperatur yang dibandingkan adalah temperatur pada kabel dan temperatur pada tanah di sekitarnya. Sebelum membandingkan hasil dari kedua jenis pemasangan, terlebih dahulu dibahas tentang hasil dari masing-masing pemasangan.

##### **4.3.1 Hasil Simulasi pada Pemasangan Berjajar dengan Duct**

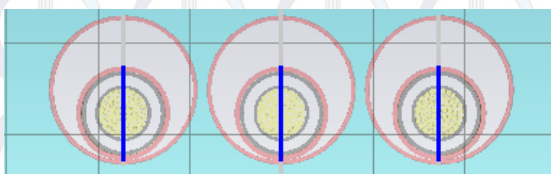
Pada simulasi ini kita akan menganalisa kondisi temperatur pada pemasangan kabel secara berjajar. Pada pemasangan ini kondisi pasir pada daerah di sekitar kabel adalah kering.

Hasil simulasi pada pemasangan berjajar dapat kita lihat pada gambar 4.15. Pada gambar 4.15 dapat kita lihat bahwa kenaikan temperatur pada daerah disekitar kabel tidak terlalu signifikan. Kenaikan temperatur pada daerah di sekitar kabel bahkan tidak sampai keluar dari daerah galian yang ditandai oleh garis hitam. Pada pemasangan ini juga kita dapat lihat bahwa pemasangan ini panas dari kabel tertahan di dalam *duct*.

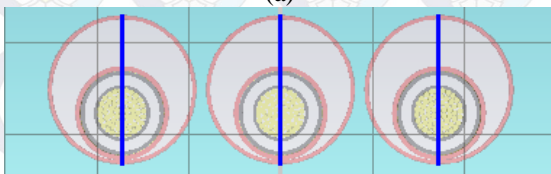


**Gambar 4.15** Hasil simulasi temperatur pemasangan kabel berjajar dengan *duct*

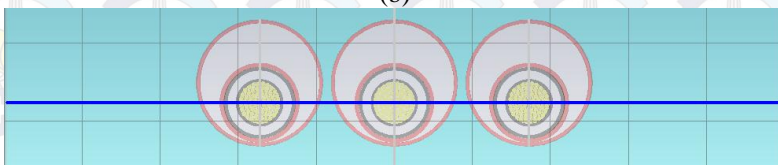
Untuk hasil yang lebih jelas maka kita tarik kurva untuk menampilkan grafik sehingga kita bisa mengetahui nilai temperatur pada daerah yang akan kita analisa.



(a)



(b)



(c)

**Gambar 4.16** Penarikan kurva untuk mendapatkan grafik (a) pada kabel (b) pada *duct* (c) horizontal



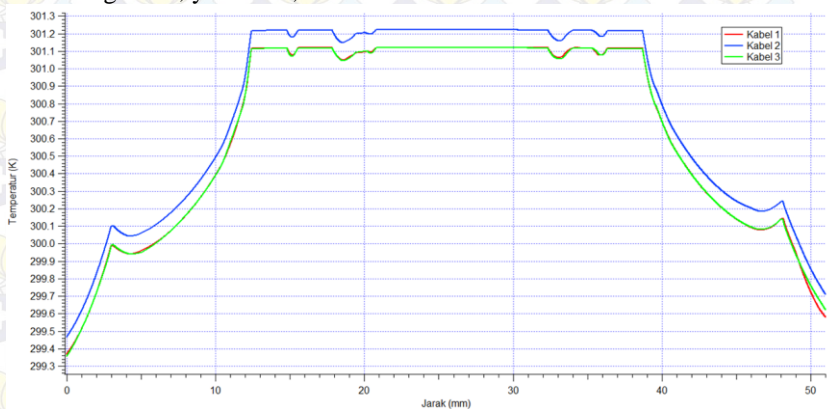
Pada gambar 4.16 dapat kita lihat kurva-kurva yang ditarik untuk mendapatkan grafik. Kurva yang ditarik ditandai dengan warna biru pada gambar 4.16.

Pada gambar 4.16 dapat kita lihat terdapat tiga kelompok penarikan kurva. Kelompok pertama (a) adalah kurva yang ditarik untuk mengetahui kondisi temperatur pada tiap kabel. Kelompok kedua (b) adalah kurva yang ditarik untuk mengetahui kondisi temperatur didalam *duct*. Kelompok ketiga (c) kurva yang ditarik untuk mengetahui persebaran panas secara horizontal pada daerah urukan tanah

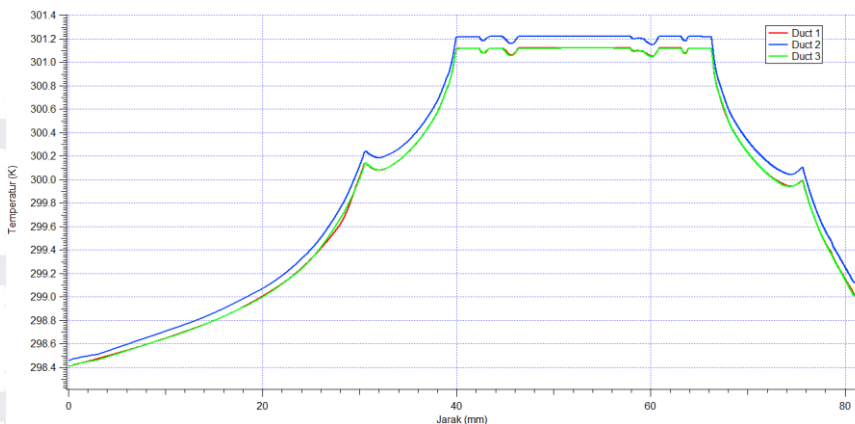
#### 4.3.1.1 Temperatur pada Kabel

Pada subbab ini akan dibahas mengenai kondisi temperatur pada tiap kabel. Sebelumnya perlu diketahui bahwa penamaan kabel, yaitu kabel 1, kabel 2, dan kabel 3 adalah berdasarkan pada posisi kabel pada gambar 4.16. Urutan penamaan kabel berurutan dari kiri ke kanan adalah kabel 1, kabel 2, dan kabel 3. Grafik ditarik pada tiap kabel dari bagian atas ke bagian bawah kabel.

Pada gambar 4.17 dapat kita lihat perbandingan temperatur pada tiap kabel. Kondisi yang terlihat mencolok pada gambar 4.18 adalah pada kabel 2, dimana temperatur pada konduktor kabel tersebut lebih tinggi dari kedua kabel lainnya yaitu sekitar 301,22 K. Sedangkan untuk kabel 1 dan kabel 3 temperatur konduktornya cenderung sama, yaitu 301,12 K.



**Gambar 4.17** Grafik perbandingan temperatur pada tiap kabel



**Gambar 4.18** Grafik perbandingan temperatur pada tiap *duct*

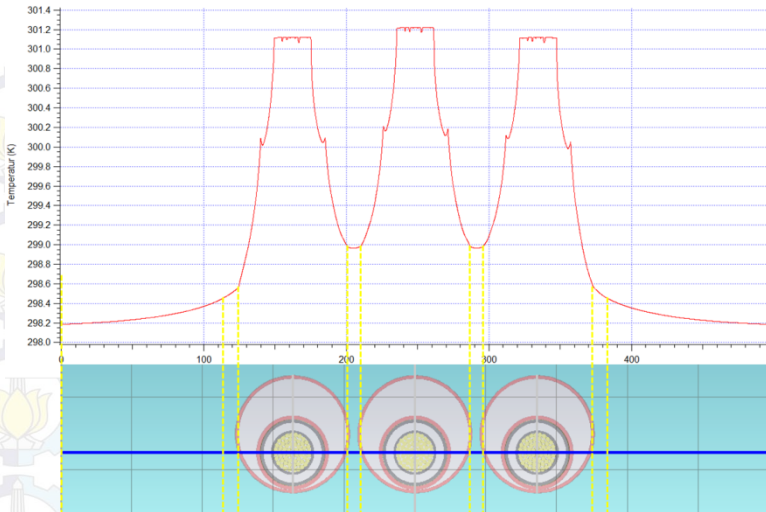
#### 4.3.1.2 Temperatur Didalam Duct

Berdasarkan pada gambar 4.16 (b) maka kita dapat menarik grafik seperti pada gambar 4.18. Kurva ditarik dari bagian atas *duct* ke arah bawah. Analisa dilakukan untuk mengetahui kondisi temperatur di dalam *duct* akibat dari temperatur kabel. Hasil penarikan kurva dapat dilihat pada gambar 4.18.

Pada gambar 4.18 dapat kita lihat bahwa temperatur pada *duct* 2 juga lebih tinggi bila dibandingkan dengan *duct* 1 dan *duct* 3. Bila kita lihat pada bagian awal grafik, atau temperatur pada bagian atas masing-masing *duct*, maka temperatur pada *duct* 2 lebih tinggi, yaitu 298.48 K sedangkan pada *duct* 1 dan *duct* 3 temperturnya adalah 298.41 K. Pada grafik juga dapat kita lihat bahwa kenaikan temperatur pada *duct* 2 bila dibandingkan dengan *duct* 1 dan *duct* 3 memiliki *slope* yang identik.

#### 4.3.1.3 Persebaran Panas Secara Horizontal

Pada subbab ini akan dibahas mengenai kondisi temperatur secara horizontal. Kurva ditarik secara horizontal sejajar dengan dua kabel yang berada di bagian bawah. Alasan pemilihan posisi tersebut diambil karena pada bagian tersebut secara teori temperturnya secara horizontal akan lebih tinggi dibandingkan pada titik lain. Data temperatur diantara kabel akan digunakan untuk menghitung kemampuan hantaran arus pada kabel bawah tanah.



**Gambar 4.19** Grafik temperatur di sekitar kabel secara horizontal

Pada gambar 4.19 dapat kita lihat secara horizontal bahwa pengaruh temperatur kabel pada tanah di sekitar lebih tinggi bila dibandingkan dengan pemasangan berjajar dengan *duct*. Pada pemasangan berjajar dengan *duct* dapat kita lihat pada jarak 10 mm dari tepi *duct* yang dilewati oleh garis biru. Pada *duct* 1 temperatur pada 10 mm dibagian kiri adalah 298,47 K, sedangkan di sebelah kanannya 299 K. Pada *duct* 2 nilai temperatur pada sisi kiri dan sisi kanan besarnya sama yaitu 299 K, sedangkan pada *duct* 3 nilai pada sisi kirinya adalah 299 K dan di sisi kannya adalah 298,47 K.

### 4.3.2 Perbandingan Pemasangan Berjajar dengan *Duct* dan Berjajar Tanpa *Duct*

Pada subbab ini akan dibahas mengenai perbandingan antara dua jenis pemasangan, yaitu pemasangan berjajar dengan *duct* dan pemasangan berjajar tanpa *duct*. Kedua pemasangan dilakukan dalam kondisi tanah yang kering. Perbandingan yang akan dilakukan yaitu perbandingan temperatur konduktor dan perbandingan *ampacity* kabel. Karena untuk pemasangan berjajar tanpa *duct* sudah dilakukan pada subbab 4.2.3, maka untuk hasil tidak dijelaskan lagi, dan data dari subbab 4.2.3 diambil sebagai pembanding pada subbab ini.

#### 4.3.2.1 Perbandingan Temperatur Konduktor

Berdasarkan subbab 4.2.1.1 dan 4.3.1.1 maka dapat kita ambil nilai temperatur konduktor pada pemasangan berjajar dan pemasangan berjajar dengan *duct*. Temperatur pada konduktor dibutuhkan untuk menghitung *ampacity* pada kabel.

Untuk lebih jelas mengenai temperatur konduktor pada tiap pemasangan dapat kita lihat pada tabel 4.5. Untuk urutan penamaan kabel dapat dilihat pada subbab 4.2.1.1 dan 4.3.1.1.

**Tabel 4.5** Temperatur Konduktor pada Pemasangan Berjajar

Penamaan Kabel	Temperatur (K)	
	Tanpa <i>Duct</i>	Dengan <i>Duct</i>
Kabel 1	301,02	301,12
Kabel 2	301,1	301,22
Kabel 3	301,02	301,12

Dari tabel 4.5 dapat kita analisa bahwa temperatur tiap konduktor pada pemasangan berjajar dengan *duct* lebih tinggi bila dibandingkan dengan pemasangan berjajar tanpa *duct*. Hal ini disebabkan karena beberapa faktor, yaitu selain karena jarak antar kabel yang lebih dekat, disipasi panas di dalam *duct* juga tidak sebaik pada tanah, karena panas yang ditimbulkan terkurung di dalam *duct*.

Pada pemasangan berjajar dengan *duct* atau tanpa *duct* hasilnya cukup menarik, karena temperatur kabel yang berada di tengah, yaitu kabel 2 nilainya lebih tinggi dari dua kabel lainnya. Hal ini disebabkan karena kabel 2 terpengaruh oleh temperatur dua kabel yang menghimpitnya.

Dari hasil ini dapat kita simpulkan bahwa pemasangan berjajar tanpa *duct* memberikan nilai temperatur konduktor yang lebih rendah, akan tetapi dengan adanya satu kabel yang memiliki temperatur lebih tinggi, maka kabel tersebut akan mengalami *derating* yang lebih besar bila dibandingkan dengan dua kabel lainnya.

#### 4.3.2.2 Perbandingan *Ampacity* Kabel

Setelah mengetahui temperatur konduktor pada tiap pemasangan maka langkah selanjutnya adalah membandingkan *ampacity* pada tiap pemasangan. Untuk perhitungan *ampacity* didapatkan berdasarkan persamaan dari standar IEC 60287 yang sudah tercantum dalam persamaan (4.7).



Berdasarkan persamaan (4.7) dibutuhkan nilai resistansi termal dan resistansi DC konduktor. Untuk perhitungan resistansi termal didapatkan berdasarkan skema pada gambar 4.14 dan untuk nilai dari resistansi DC konduktor didapatkan dari datasheet kabel, yaitu sebesar  $0.0283 \Omega/\text{km}$  atau  $2.83 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$ .

Untuk menghitung resistansi termal maka dibutuhkan data temperatur tanah disekitar kabel. Jarak yang dipakai untuk mengetahui temperatur tanah dari kabel pada tugas akhir ini adalah 10 mm dari tepi masing-masing *duct* yang dilewati garis penarikan kurva. Karena pada pemasangan berjajar dengan *duct* ini nilai temperatur pada satu sisi dengan sisi lainnya berbeda, maka diambil nilai tengahnya. Untuk lebih jelasnya nilai temperatur dapat dilihat pada tabel 4.6.

**Tabel 4.6** Temperatur tanah di sekitar kabel pada pemasangan berjajar dengan *duct*

Penamaan Berjajar	Temperatur (K)		
	Sisi Kiri	Sisi Kanan	Nilai Rata-rata
Kabel 1	298,47	299	298,72
Kabel 2	299	299	299
Kabel 3	299	298,47	298,72

Untuk temperatur konduktor pada pemasangan berjajar tanpa *duct* dapat dilihat pada tabel 4.2.

Setelah mendapatkan nilai temperatur pada tanah disekitar kabel maka langkah selanjutnya adalah menentukan resistansi termal dari masing-masing kabel. Berdasarkan rumus (4.8) dan dengan nilai  $W$  pada tiap kabel sama, yaitu  $10,737 \text{ W/m}$  serta temperatur diubah kedalam satuan  $^{\circ}\text{C}$  maka didapatkan hasil resistansi termal dari tiap kabel ke tanah seperti pada tabel 4.7.

**Tabel 4.7** Resistansi Termal pada Pemasangan Berjajar

Penamaan Kabel	Resistansi Termal ( $\text{m.K/W}$ )	
	Tanpa <i>Duct</i>	Dengan <i>Duct</i>
Kabel 1	0,185	0,223
Kabel 2	0,182	0,207
Kabel 3	0.188	0,223

Setelah mendapatkan nilai temperatur dari konduktor, tanah sekitar, dan resistansi termal, maka dapat kita hitung *ampacity* kabel. Berdasarkan rumus (4.7) maka didapatkan hasil seperti pada tabel 4.8.

**Tabel 4.8** *Ampacity* pada Pemasangan Berjajar

Penamaan Kabel	Ampacity (A)	
	Tanpa <i>Duct</i>	Dengan <i>Duct</i>
Kabel 1	615,745	616,680
Kabel 2	615,302	615,599
Kabel 3	616,174	616,680

Dari tabel 4.5 dan 4.8 maka dapat kita analisa beberapa hal, yaitu pada pemasangan berjajar dengan *duct*, temperatur konduktor lebih tinggi bila dibandingkan dengan pemasangan tanpa *duct*. Walaupun nilai temperatur konduktor pada pemasangan berjajar dengan *duct* lebih tinggi, ternyata pemasangan berjajar dengan *duct* memiliki *ampacity* yang lebih baik bila dibandingkan dengan pemasangan tanpa *duct*. Hal ini disebabkan karena persebaran panas pada pemasangan berjajar dengan *duct* tertahan didalam *duct*, sehingga pengaruhnya terhadap tanah disekitarnya lebih kecil dari pemasangan tanpa *duct*.

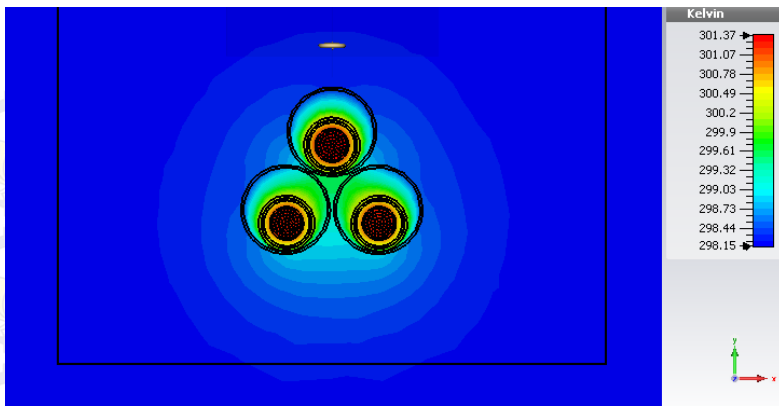
Pada kedua pemasangan, *ampacity* pada tiap kabel nilainya berbeda. Kabel 2 memiliki *ampacity* yang paling rendah, hal ini disebabkan karena tingginya temperatur pada kabel akibat dari temperatur dua kabel lain yang menghimpit kabel 2.

#### **4.4 Perbandingan Temperatur pada Pemasangan Kabel *Trefoil* tanpa *Duct* dan *Trefoil* dengan *Duct***

Pada pembahasan ini akan dilakukan perbandingan temperatur pada pemasangan kabel secara berjajar dan *trefoil*. Temperatur yang dibandingkan adalah temperatur pada kabel dan temperatur pada tanah di sekitarnya. Sebelum membandingkan hasil dari kedua jenis pemasangan, terlebih dahulu dibahas tentang hasil dari masing-masing pemasangan.

##### **4.4.1 Hasil Simulasi pada Pemasangan *Trefoil* dengan *Duct***

Pada simulasi ini kita akan menganalisa kondisi temperatur pada pemasangan kabel secara *trefoil*. Pada pemasangan ini kondisi pasir pada daerah di sekitar kabel adalah kering.

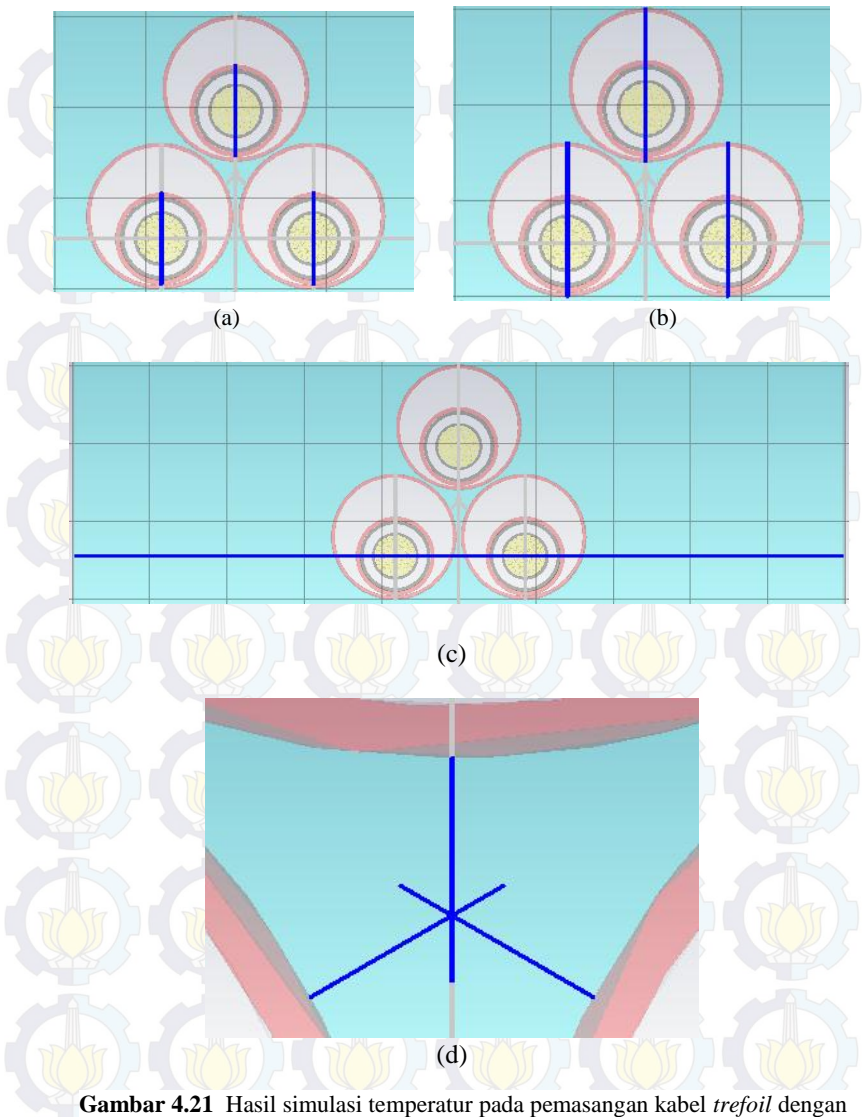


**Gambar 4.20** Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel *trefoil* dengan *duct*

Hasil simulasi pada pemasangan berjajar dapat kita lihat pada gambar 4.20. Pada gambar 4.20 dapat kita lihat bahwa kenaikan temperatur pada daerah disekitar kabel tidak terlalu signifikan. Kenaikan temperatur bahkan tidak sampai keluar dari daerah urukan secara horizontal, walaupun panasnya turun sampai keluar bagian bawah tanah urukan.

Untuk hasil yang lebih jelas maka kita tarik kurva untuk menampilkan grafik sehingga kita bisa mengetahui temperatur pada daerah yang akan kita analisa. Pada gambar 4.21 dapat kita lihat kurva yang ditarik untuk mendapatkan grafik ditandai dengan warna biru.

Pada gambar 4.21 dapat kita lihat teradapat lima kelompok penarikan kurva. Kelompok pertama (a) adalah kurva yang ditarik untuk mengetahui kondisi temperatur pada tiap kabel. Kelompok kedua (b) adalah kurva yang ditarik untuk mengetahui kondisi temperatur didalam *duct*. Kelompok ketiga (c) adalah kurva yang ditarik untuk mengetahui persebaran panas secara horizontal pada daerah urukan tanah, dan kelompok keempat (d) adalah kurva yang ditarik untuk mengetahui temperatur di area tengah ketiga *duct*.



**Gambar 4.21** Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel *trefoil* dengan *duct* (a) pada kabel (b) pada *duct* (c) horizontal (d) diantara *duct*



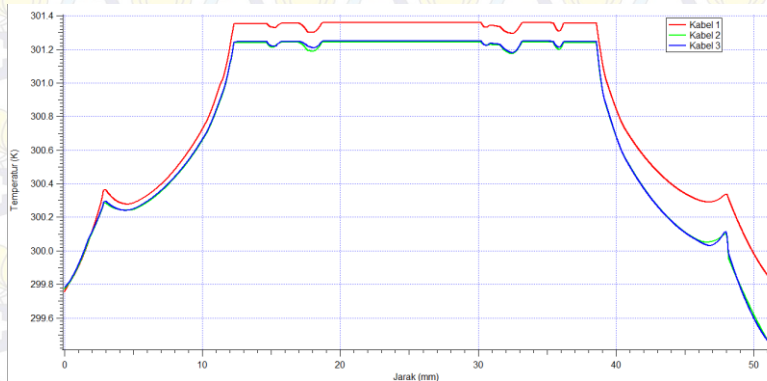
#### 4.4.1.1 Temperatur pada Kabel

Pada subbab ini akan dibahas mengenai kondisi temperatur pada tiap kabel. Sebelumnya perlu diketahui bahwa penamaan kabel, yaitu kabel 1, kabel 2, dan kabel 3 adalah berdasarkan pada posisi kabel pada gambar 4.21. Kabel 1 adalah kabel yang berada di atas, kabel 2 adalah kabel yang berada di bawah sebelah kanan, dan kabel 3 adalah kabel yang berada di bawah sebelah kiri. Grafik ditarik pada tiap kabel dari bagian atas ke bagian bawah kabel.

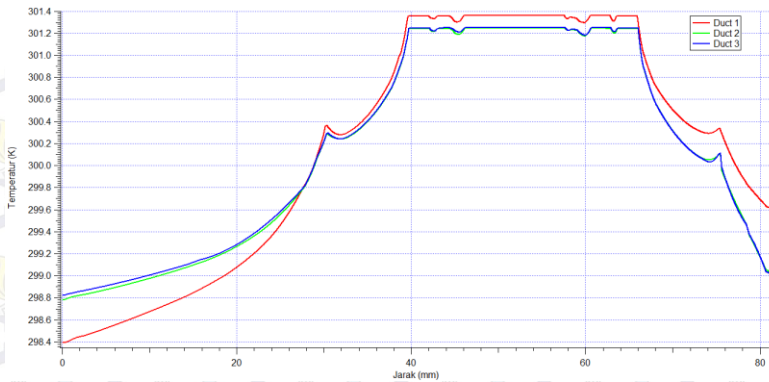
Pada gambar 4.22 dapat kita lihat perbandingan temperatur pada tiap kabel. Kondisi yang terlihat mencolok pada gambar 4.22 adalah pada kabel 1, dimana temperatur pada konduktor kabel tersebut lebih tinggi dari kedua kabel lainnya yaitu sekitar 301,36 K. Sedangkan untuk kabel 1 dan kabel 3 temperatur konduktornya cenderung sama, yaitu 301,24 K.

#### 4.4.1.2 Temperatur Didalam Duct

Berdasarkan pada gambar 4.21 (b) maka kita dapat menarik grafik seperti pada gambar 4.23. Kurva ditarik dari bagian atas *duct* ke arah bawah. Analisa dilakukan untuk mengetahui kondisi temperatur di dalam *duct* akibat dari temperatur kabel. Hasil penarikan kurva dapat dilihat pada gambar 4.23.

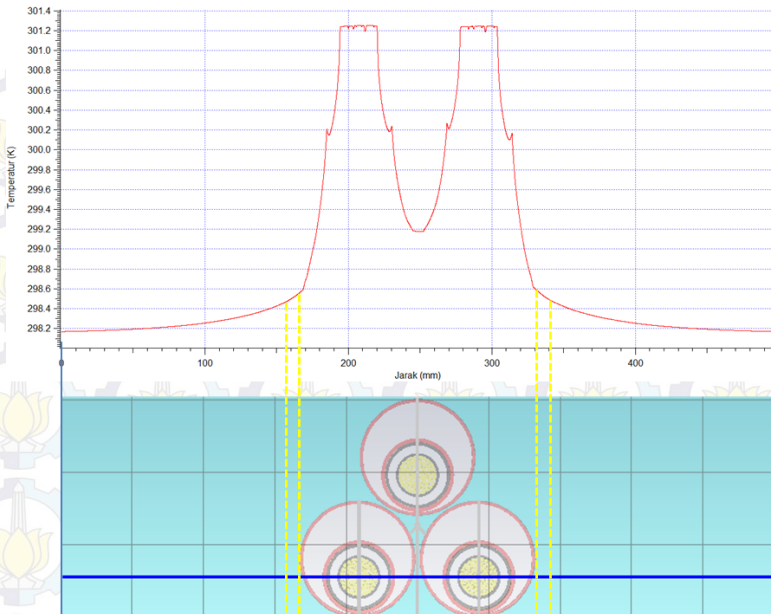


**Gambar 4.22** Grafik perbandingan temperatur pada tiap kabel



**Gambar 4.23** Grafik perbandingan temperatur pada tiap *duct*

Pada gambar 4.23 dapat kita lihat bahwa temperatur pada *duct* 1 sebenarnya pada bagian atas lebih rendah bila dibandingkan dengan *duct* 2 dan *duct* 3, akan tetapi temperatur kabel di dalam *duct* 1 lebih tinggi. Akibat dari kondisi tersebut maka pada grafik dapat kita lihat pada *duct* 1 yang awalnya nilainya lebih rendah, diakhir grafik nilainya lebih tinggi daripada *duct* 2 dan *duct* 3. Kondisi pada bagian paling atas *duct* 1 temperatur awalnya adalah 298.4 K, pada *duct* 2 nilainya adalah 298,78 K, sedangkan pada *duct* 3 adalah 298,82. Temperatur pada bagian atas *duct* 1 jauh lebih rendah karena tidak terpengaruh panas dari 2 kabel lain.



**Gambar 4.24** Grafik temperatur di sekitar kabel secara horizontal

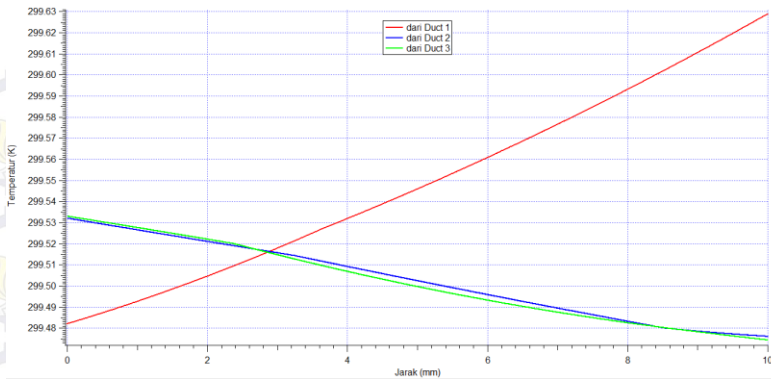
#### 4.4.1.3 Persebaran Panas Secara Horizontal

Pada subbab ini akan dibahas mengenai kondisi temperatur secara horizontal. Kurva ditarik secara horizontal sejajar dengan dua kabel yang berada di bagian bawah. Alasan pemilihan posisi tersebut diambil karena pada bagian tersebut secara teori temperaturnya secara horizontal akan lebih tinggi dibandingkan pada titik lain.

Pada gambar 4.24 dapat kita lihat secara horizontal bahwa pengaruh temperatur kabel pada tanah di sekitar sama nilainya di sisi kiri dan kanan sejauh 10 mm dari tepi *duct* yang dilewati oleh garis biru yaitu 298,46 K.

#### 4.4.1.4 Temperatur Diantara *Duct*

Berdasarkan pengambilan kurva seperti pada gambar 4.21 (d), maka pada gambar 4.25 dapat kita lihat perbandingan temperatur diantara ketiga *duct*. Dapat kita lihat bahwa diantara ketiga *duct* terjadi penurunan temperatur yang cenderung sama pada *duct* 2 dan *duct* 3.



**Gambar 4.25** Grafik perbandingan temperatur diantara 3 *duct*

akan tetapi pada *duct* 1 temperaturnya lebih tinggi. Pengambilan data pada *duct* 1 memang sengaja diambil terbalik, agar menghasilkan perpotongan dimana grafik yang ditarik dari ketiga *duct* bertemu pada temperatur yang sama.

Dari gambar 4.25 dapat kita ketahui temperatur pada jarak 10 mm ke arah dalam dari masing-masing *duct*. Pada jarak 10 mm temperatur pada *duct* 1 adalah 299,482 K, pada *duct* 2 adalah 299,476 K, dan pada *duct* 3 adalah 299,474 K.

#### 4.4.2 Perbandingan Hasil Simulasi Pemasangan *Trefoil* dengan *Duct* dan *Trefoil* Tanpa *Duct*

Pada subbab ini akan dibahas mengenai perbandingan antara dua jenis pemasangan, yaitu pemasangan *trefoil* dengan *duct* dan pemasangan *trefoil* tanpa *duct*. Kedua pemasangan dilakukan dalam kondisi tanah yang kering. Perbandingan yang akan dilakukan yaitu perbandingan temperatur konduktor dan perbandingan *ampacity* kabel. Karena untuk pemasangan *trefoil* tanpa *duct* sudah dilakukan pada subbab 4.2.2, maka untuk hasil tidak dijelaskan lagi, dan data dari subbab 4.2.2 diambil sebagai pembanding pada subbab ini.



#### 4.4.2.1 Perbandingan Temperatur Konduktor

Berdasarkan subbab 4.2.2.1 dan 4.4.1.1 maka dapat kita ambil nilai temperatur konduktor pada pemasangan *trefoil* tanpa *duct* dan pemasangan *trefoil* dengan *duct*. Temperatur pada konduktor dibutuhkan untuk menghitung *ampacity* pada kabel.

Untuk lebih jelas mengenai temperatur konduktor pada tiap pemasangan dapat kita lihat pada tabel 4.9. Untuk urutan penamaan kabel dapat dilihat pada subbab 4.2.2.1 dan 4.4.1.1.

**Tabel 4.9** Temperatur Konduktor pada Pemasangan *Trefoil*

Penamaan Kabel	Temperatur (K)	
	Tanpa <i>Duct</i>	Dengan <i>Duct</i>
Kabel 1	301,76	301,36
Kabel 2	301,76	301,24
Kabel 3	301,76	301,24

Dari tabel 4.5 dapat kita analisa bahwa temperatur tiap konduktor pada pemasangan *trefoil* dengan *duct* lebih rendah bila dibandingkan dengan pemasangan berjajar tanpa *duct*. Hal ini disebabkan karena ketiga kabel tidak langsung bersentuhan.

Pada pemasangan *trefoil* dengan *duct* atau tanpa *duct* hasilnya cukup menarik, karena temperatur konduktor yang pada pemasangan tanpa *duct* besarnya sama, sedangkan setelah pada pemasangan dengan *duct* temperatur konduktor tidak lagi seragam. Hal ini terjadi karena ketiga kabel tidak saling mempengaruhi secara langsung.

#### 4.4.2.2 Perbandingan *Ampacity* Kabel

Setelah mengetahui temperatur konduktor pada tiap pemasangan maka langkah selanjutnya adalah membandingkan *ampacity* pada tiap pemasangan. Untuk perhitungan *ampacity* didapatkan berdasarkan persamaan dari standar IEC 60287 yang sudah tercantum dalam persamaan (4.7).

Berdasarkan persamaan (4.7) dibutuhkan nilai resistansi termal dan resistansi DC konduktor. Untuk perhitungan resistansi termal didapatkan berdasarkan skema pada gambar 4.14 dan untuk nilai dari resistansi DC konduktor didapatkan dari datasheet kabel, yaitu sebesar  $0.0283 \Omega/\text{km}$  atau  $2.83 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$ .

Untuk menghitung resistansi termal maka dibutuhkan data temperatur tanah disekitar kabel. Jarak yang dipakai untuk mengetahui temperatur tanah dari kabel pada tugas akhir ini adalah 10 mm dari tepi masing-masing *duct* yang dilewati garis penarikan kurva. Karena pada pemasangan berjajar dengan *duct* ini nilai temperatur pada satu sisi dengan sisi lainnya berbeda, maka diambil nilai tengahnya. Untuk lebih jelasnya nilai temperatur dapat dilihat pada tabel 4.6.

**Tabel 4.10** Temperatur tanah di sekitar kabel pada pemasangan *trefoil* dengan *duct*

Penamaan Berjajar	Temperatur (K)		
	Sisi Dalam	Sisi Luar	Nilai Rata-rata
Kabel 1	299,482	298,46	298,971
Kabel 2	299,476	298,46	298,968
Kabel 3	299,474	298,46	298,967

Untuk temperatur konduktor pada pemasangan *trefoil* tanpa *duct* dapat dilihat pada subbab 4.2.3.2 yaitu senilai 299,7 K

Setelah mendapatkan nilai temperatur pada tanah disekitar kabel maka langkah selanjutnya adalah menentukan resistansi termal dari masing-masing kabel. Berdasarkan rumus (4.8) dan dengan nilai  $W$  pada tiap kabel sama, yaitu 10,737 W/m serta temperatur diubah kedalam satuan  $^{\circ}\text{C}$  maka didapatkan hasil resistansi termal dari tiap kabel ke tanah seperti pada tabel 4.11.

**Tabel 4.11** Resistansi Termal pada Pemasangan *Trefoil*

Penamaan Kabel	Resistansi Termal ( m.K/W)	
	Tanpa <i>Duct</i>	Dengan <i>Duct</i>
Kabel 1	0,192	0,222
Kabel 2	0,192	0,212
Kabel 3	0,192	0,212

Setelah mendapatkan nilai temperatur dari konduktor, tanah sekitar, dan resistansi termal, maka dapat kita hitung *ampacity* kabel. Berdasarkan rumus (4.7) maka didapatkan hasil seperti pada tabel 4.12.

**Tabel 4.12** *Ampacity* pada Pemasangan *Trefoil*

Penamaan Kabel	Ampacity (A)	
	Tanpa <i>Duct</i>	Dengan <i>Duct</i>
Kabel 1	615,729	616,649
Kabel 2	615,729	615,379
Kabel 3	615,729	615,514

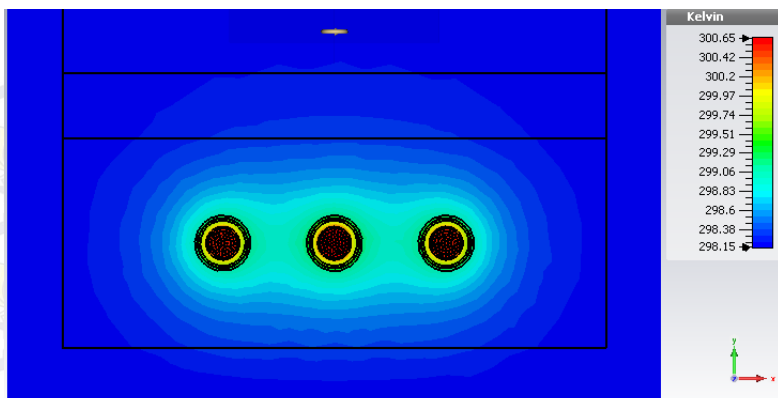
Dari tabel 4.9 dan 4.12 maka dapat kita analisa beberapa hal, yaitu pada pemasangan *trefoil* dengan *duct*, temperatur konduktor lebih rendah bila dibandingkan dengan pemasangan tanpa *duct*. Walaupun nilai temperatur konduktor pada pemasangan *trefoil* dengan *duct* lebih tinggi, ternyata pemasangan *trefoil* dengan *duct* memiliki *ampacity* yang lebih buruk bila dibandingkan dengan pemasangan tanpa *duct*. Akan tetapi pada kabel 1 ,walaupun temperaturnya lebih tinggi bila dibandingkan kabel 2 dan kabel 3, ternyata *ampacity*-nya lebih baik daipada kabel 2 dan kabel 3. Kabel 1 pada pemasangan *trefoil* dengan *duct* memiliki *ampacity* yang lebih baik karena jaraknya yang lebih jauh dari kedua kabel lainnya.

#### **4.5 Perbandingan Temperatur pada Pemasangan Kabel Berjajar Kondisi Kering dan Berjajar kondisi Basah**

Pada pembahasan ini akan dilakukan perbandingan temperatur pada pemasangan kabel secara berjajar dalam kondisi kering dan basah. Temperatur yang dibandingkan adalah temperatur pada kabel dan temperatur pada tanah di sekitarnya. Sebelum membandingkan hasil dari kedua jenis pemasangan, terlebih dahulu dibahas tentang hasil dari masing-masing pemasangan. Karena untuk pemasangan berjajar dalam kondisi kering telah dilakukan pada bab 4.2 maka yang dibahas pada subbab selanjutnya hanya pemasangan pada kondisi basah saja.

##### **4.5.1 Hasil Simulasi pada Pemasangan Berjajar dengan Kondisi Basah**

Pada simulasi ini kita akan menganalisa kondisi temperatur pada pemasangan kabel berjajar dalam kondisi tanah basah dalam dengan persentase air sebesar 18 %. Hasil simulasi pada pemasangan berjajar dapat kita lihat pada gambar 4.26. Pada gambar 4.26 dapat kita lihat bahwa kenaikan temperatur pada daerah disekitar kabel tidak terlalu signifikan. Kenaikan temperatur pada daerah di sekitar kabel bahkan tidak sampai keluar dari daerah galian yang ditandai garis



**Gambar 4.26** Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel berjajar berwarna hitam. Pada pemasangan ini juga kita dapat lihat bahwa pemasangan ini hanya berpengaruh sangat kecil pada perubahan temperatur yang terjadi pada beton penutup kabel.

Untuk hasil yang lebih jelas maka kita tarik kurva untuk menampilkan grafik sehingga kita bisa mengetahui nilai temperatur pada daerah yang akan kita analisa. Penarikan kurva dilakukan pada tempat yang sama seperti pada gambar 4.3.

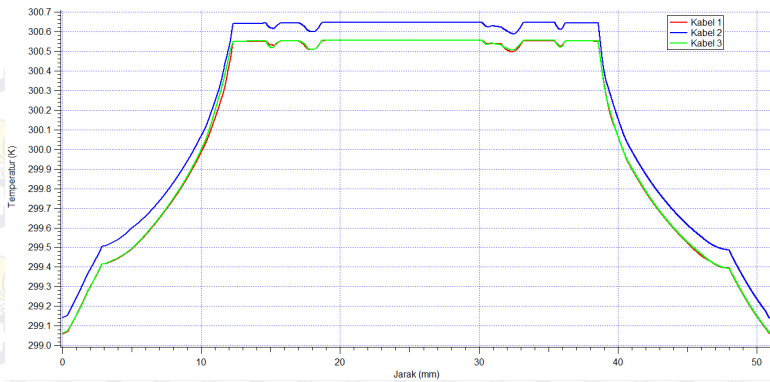
Pada gambar 4.3 dapat kita lihat kurva-kurva yang ditarik untuk mendapatkan grafik. Kurva yang ditarik ditandai dengan warna biru pada gambar 4.3.

#### 4.5.1.1 Temperatur pada Kabel

Pada subbab ini akan dibahas mengenai kondisi temperatur pada tiap kabel. Sebelumnya perlu diketahui bahwa penamaan kabel, yaitu kabel 1, kabel 2, dan kabel 3 adalah berdasarkan pada posisi kabel pada gambar 4.3. Urutan penamaan kabel berurutan dari kiri ke kanan adalah kabel 1, kabel 2, dan kabel 3.

Pada gambar 4.27 dapat kita lihat perbandingan temperatur pada tiap kabel. Kondisi yang terlihat mencolok pada gambar 4.27 adalah pada kabel 2, dimana temperatur pada kabel tersebut lebih tinggi dari kedua kabel lainnya yaitu sekitar 300,65 K. Sedangkan untuk kabel 1 dan kabel 3 temperturnya cenderung sama, yaitu 300,56 K.

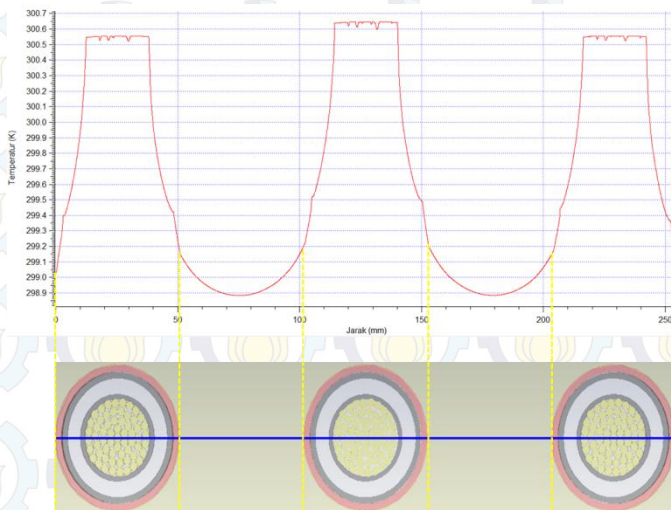




**Gambar 4.27** Grafik perbandingan temperatur pada tiap kabel

#### 4.5.1.2 Temperatur Antar Kabel

Pada subbab ini akan dibahas mengenai kondisi temperatur diantara ketiga kabel. Analisa dilakukan untuk mengetahui temperatur diantara kabel yang akan digunakan untuk menghitung kemampuan hantaran arus pada kabel bawah tanah.



**Gambar 4.28** Grafik temperatur antar kabel

Pada gambar 4.28 dapat kita lihat bahwa temperatur diantara kabel, baik antara kabel 1 dan kabel 2, maupun kabel 2 ke kabel 3 memiliki temperatur yang cenderung sama. Menurunnya nilai pada grafik menunjukkan penurunan dalam selang yang sama. Meskipun dalam grafik terlihat temperatur pada daerah di sekitar kabel rendah, akan tetapi sebenarnya temperatur pada tanah diantara kabel mengalami kenaikan. Pada mulanya temperatur tanah adalah 298,15 K, akan tetapi setelah kabel dioperasikan pada kondisi yang dijelaskan pada bab 4.1, maka terjadi kenaikan sampai 299,05 K untuk daerah yang paling dekat dengan kabel.

#### 4.5.1.3 Persebaran Panas Secara Horizontal

Pada subbab ini akan dibahas mengenai kondisi temperatur diantara ketiga kabel. Analisa dilakukan untuk mengetahui temperatur diantara kabel yang akan digunakan untuk menghitung kemampuan hantaran arus pada kabel bawah tanah.

Pada gambar 4.29 menampilkan efek temperatur kabel terhadap luasan tanah urukan secara horizontal. Dari gambar 4.29 dapat kita analisa bahwa temperatur pada tanah di bagian luar kabel lebih rendah daripada yang berada diantara ketiga kabel.



**Gambar 4.29** Grafik temperatur di sekitar kabel secara horizontal

Dapat kita lihat garis putus-putus yang berwarna kuning pada gambar 4.29 menunjukkan daerah yang diamati. Pada garis putus-putus kuning yang berjarak 10 mm dari permukaan kabel digunakan untuk mengamati nilai temperatur tanah yang digunakan untuk perhitungan *ampacity*. Dari gambar 4.29 maka dapat kita ketahuinilai pada sisi kiri dan sisi kanan masing-masing kabel berturut-turut yaitu; kabel 1 298,78 K dan 298,94, kabel 2 298,97 K dan 299,02 K, kabel 3 298,94 dan 298,78 K. Secara horizontal juga dapat kita lihat bahwa panas dari kabel mempengaruhi temperatur tanah di sekitarnya kurang lebih 12 mm dari masing-masing pinggir galian tanah.

#### **4.5.2 Perbandingan Hasil Simulasi Pemasangan Berjajar Kondisi Kering dan Berjajar Kondisi Basah**

Pada subbab ini akan dibahas mengenai perbandingan antara dua jenis pemasangan, yaitu pemasangan berjajar dalam kondisi kering dan pemasangan berjajar dalam kondisi basah. Perbandingan yang akan dilakukan yaitu perbandingan temperatur konduktor dan perbandingan *ampacity* kabel. Karena untuk pemasangan berjajar dalam kondisi kering sudah dilakukan pada subbab 4.2.1, maka untuk hasil tidak dijelaskan lagi, dan data dari subbab 4.2.1 diambil sebagai pembandingan pada subbab ini.

##### **4.5.2.1 Perbandingan Temperatur Konduktor**

Berdasarkan subbab 4.2.1.1 dan 4.5.1.1 maka dapat kita ambil nilai temperatur konduktor pada pemasangan berjajar dalam kondisi basah dan kering. Temperatur pada konduktor dibutuhkan untuk menghitung *ampacity* pada kabel.

Untuk lebih jelas mengenai temperatur konduktor pada tiap pemasangan dapat kita lihat pada tabel 4.13. Untuk urutan penamaan kabel dapat dilihat pada subbab 4.2.1.1 dan 4.5.1.1.

**Tabel 4.13** Temperatur Konduktor pada Pemasangan Berjajar

Penamaan Kabel	Temperatur (K)	
	Kering	Basah
Kabel 1	301,02	300,56
Kabel 2	301,1	300,65
Kabel 3	301,02	300,56

Dari tabel 4.13 dapat kita analisa bahwa temperatur tiap konduktor pada pemasangan berjajar dalam kondisi kering lebih tinggi bila dibandingkan dengan kondisi basah. Hal ini disebabkan karena beberapa air dalam tanah menurunkan temperatur daerah sekitar.

Pada pemasangan berjajar ini hasilnya cukup menarik, karena temperatur kabel yang berada di tengah, yaitu kabel 2 nilainya lebih tinggi dari dua kabel lainnya. Hal ini disebabkan karena kabel 2 terpengaruh oleh temperatur dua kabel yang menghimpitnya.

#### 4.5.2.2 Perbandingan *Ampacity* Kabel

Setelah mengetahui temperatur konduktor pada tiap pemasangan maka langkah selanjutnya adalah membandingkan *ampacity* pada tiap pemasangan. Untuk perhitungan *ampacity* didapatkan berdasarkan persamaan dari standar IEC 60287 yang sudah tercantum dalam persamaan (4.7).

Berdasarkan persamaan (4.7) dibutuhkan nilai resistansi termal dan resistansi DC konduktor. Untuk perhitungan resistansi termal didapatkan berdasarkan skema pada gambar 4.14 dan untuk nilai dari resistansi DC konduktor didapatkan dari datasheet kabel, yaitu sebesar  $0.0283 \Omega/\text{km}$  atau  $2.83 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$ .

Untuk menghitung resistansi termal maka dibutuhkan data temperatur tanah disekitar kabel. Jarak yang dipakai untuk mengetahui temperatur tanah dari kabel pada tugas akhir ini adalah 10 mm dari tepi masing-masing *duct* yang dilewati garis penarikan kurva. Karena pada pemasangan berjajar dengan *duct* ini nilai temperatur pada satu sisi dengan sisi lainnya berbeda, maka diambil nilai tengahnya. Untuk lebih jelasnya nilai temperatur dapat dilihat pada tabel 4.14.

**Tabel 4.14** Temperatur tanah di sekitar kabel pada pemasangan berjajar dalam kondisi basah

Penamaan Berjajar	Temperatur (K)		
	Sisi Kiri	Sisi Kanan	Nilai Rata-rata
Kabel 1	298,78	298,94	298,86
Kabel 2	298,97	299,02	298,995
Kabel 3	298,94	298,78	298,86

Untuk temperatur konduktor pada pemasangan berjajar dalam kondisi kering dapat dilihat pada tabel 4.2.



Setelah mendapatkan nilai temperatur pada tanah disekitar kabel maka langkah selanjutnya adalah menentukan resistansi termal dari masing-masing kabel. Berdasarkan rumus (4.8) dan dengan nilai  $W$  pada tiap kabel sama, yaitu 10,737 W/m serta temperatur diubah kedalam satuan  $^{\circ}\text{C}$  maka didapatkan hasil resistansi termal dari tiap kabel ke tanah seperti pada tabel 4.15.

**Tabel 4.15** Resistansi Termal pada Pemasangan Berjajar

Penamaan Kabel	Resistansi Termal ( m.K/W)	
	Kering	Basah
Kabel 1	0,185	0,158
Kabel 2	0,182	0,154
Kabel 3	0.188	0,158

Setelah mendapatkan nilai temperatur dari konduktor, tanah sekitar, dan resistansi termal, maka dapat kita hitung *ampacity* kabel. Berdasarkan rumus (4.7) maka didapatkan hasil seperti pada tabel 4.16.

**Tabel 4.16** *Ampacity* pada Pemasangan Berjajar

Penamaan Kabel	Ampacity (A)	
	Kering	Basah
Kabel 1	615,745	616,598
Kabel 2	615,302	616,234
Kabel 3	616,174	616,598

Dari tabel 4.13 dan 4.16 maka dapat kita analisa beberapa hal, yaitu pada pemasangan berjajar dalam kondisi basah, temperatur konduktor lebih rendah bila dibandingkan dengan pemasangan tdalam kondisi kering. Nilai temperatur konduktor pada kondisi basah juga lebih rendah, dan pemasangan berjajar dengan kondisi basah memiliki *ampacity* yang lebih baik bila dibandingkan dengan pemasangan dalam kondisi kering. Hal ini disebabkan karena persebaran panas pada pemasangan berjajar dengan kondisi basah tertahan oleh temperatur air, sehingga pengaruhnya terhadap tanah disekitarnya lebih kecil dari pemasangan dalam kondisi kering.

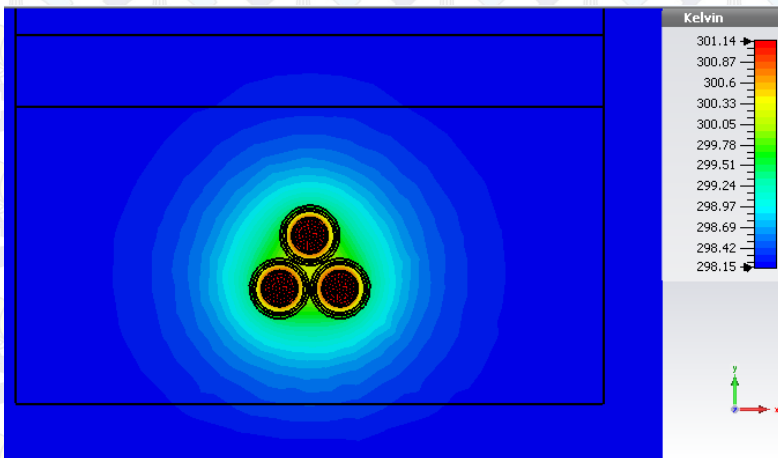
Pada kedua pemasangan, *ampacity* pada tiap kabel nilainya berbeda. Kabel 2 memiliki *ampacity* yang paling rendah, hal ini disebabkan karena tingginya temperatur pada kabel akibat dari temperatur dua kabel lain yang menghimpit kabel 2.

#### 4.6 Perbandingan Temperatur pada Pemasangan Kabel *Trefoil* Kondisi Kering dan *Trefoil* kondisi Basah

Pada pembahasan ini akan dilakukan perbandingan temperatur pada pemasangan kabel secara *trefoil* dalam kondisi kering dan basah. Temperatur yang dibandingkan adalah temperatur pada kabel dan temperatur pada tanah di sekitarnya. Sebelum membandingkan hasil dari kedua jenis pemasangan, terlebih dahulu dibahas tentang hasil dari masing-masing pemasangan. Karena untuk pemasangan *trefoil* dalam kondisi kering telah dilakukan pada bab 4.2 maka yang dibahas pada subbab selanjutnya hanya pemasangan pada kondisi basah saja.

##### 4.6.1 Hasil Simulasi pada Pemasangan *Trefoil* dengan Kondisi Basah

Pada simulasi ini kita akan menganalisa kondisi temperatur pada pemasangan kabel berjajar dalam kondisi tanah basah dalam dengan persentase air sebesar 18 %. Hasil simulasi pada pemasangan berjajar dapat kita lihat pada gambar 4.30. Pada gambar 4.30 dapat kita lihat bahwa kenaikan temperatur pada daerah disekitar kabel tidak terlalu signifikan. Kenaikan temperatur pada daerah di sekitar kabel bahkan tidak sampai keluar dari daerah galian yang ditandai garis



**Gambar 4.30** Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel berjajar

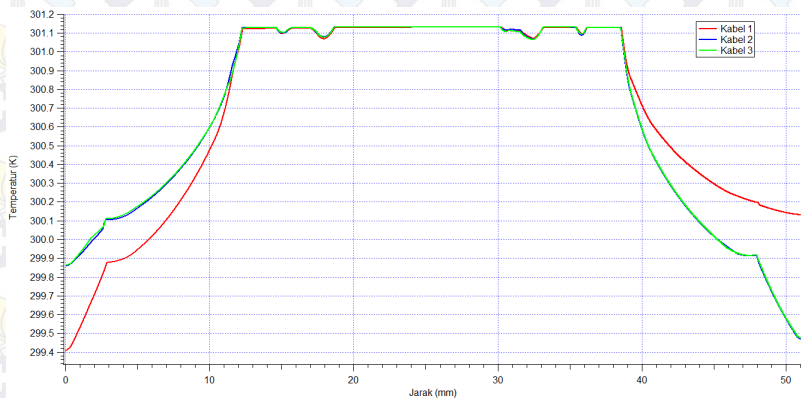
berwarna hitam. Pada pemasangan ini juga kita dapat lihat bahwa pemasangan ini hanya berpengaruh sangat kecil pada perubahan temperatur yang terjadi pada beton penutup kabel.

Untuk hasil yang lebih jelas maka kita tarik kurva untuk menampilkan grafik sehingga kita bisa mengetahui nilai temperatur pada daerah yang akan kita analisa. Penarikan kurva dilakukan pada tempat yang sama seperti pada gambar 4.9.

Pada gambar 4.9 dapat kita lihat kurva-kurva yang ditarik untuk mendapatkan grafik. Kurva yang ditarik ditandai dengan warna biru pada gambar 4.9.

#### 4.6.1.1 Temperatur pada Kabel

Pada subbab ini akan dibahas mengenai kondisi temperatur pada tiap kabel. Sebelumnya perlu diketahui bahwa penamaan kabel, yaitu kabel 1, kabel 2, dan kabel 3 adalah berdasarkan pada posisi kabel pada gambar 4.3. Kabel 1 adalah kabel yang berada di atas, kabel 2 adalah kabel yang berada di bawah sebelah kanan, dan kabel 3 adalah kabel yang berada dibawah sebelah kiri. Grafik ditarik pada tiap kabel dari bagian atas ke bagian bawah kabel.



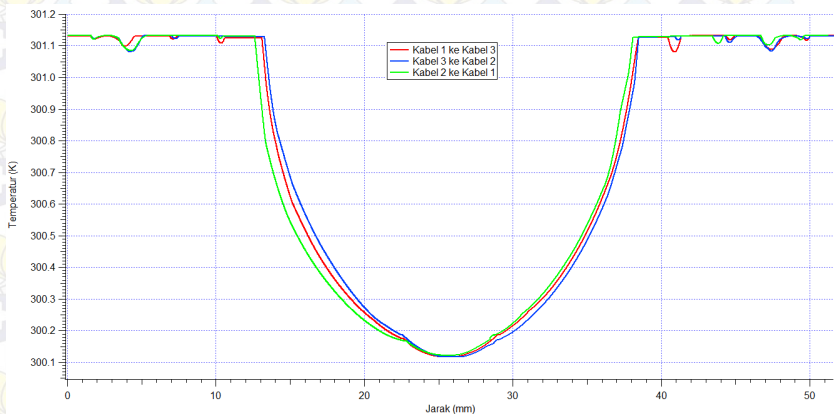
**Gambar 4.31** Grafik perbandingan temperatur pada tiap kabel

Pada gambar 4.31 dapat kita lihat perbandingan temperatur pada tiap kabel. Pada gambar 4.31 dapat kita lihat bahwa temperatur pada tiap konduktor kurang lebih menunjukkan nilai yang sama, yaitu 301,14 K. Pada gambar 4.31 yang menarik adalah kondisi atas kabel dan bawah kabel yang ditunjukkan oleh bagian awal dan akhir grafik.

Pada bagian awal grafik kita bisa lihat bahwa temperatur pada kabel 1 lebih rendah dibandingkan dengan kabel 2 dan kabel 3. Hal ini disebabkan karena pada kabel 1 temperaturnya tidak dipengaruhi oleh temperatur 2 kabel lainnya. Sedangkan pada kabel 2 dan 3 dibagian atasnya terpengaruh oleh 2 kabel lainnya.

Pada bagian akhir grafik dapat kita lihat bahwa kondisinya berkebalikan dengan bagian awal grafik. Pada kabel 2 dan kabel 3 temperaturnya lebih rendah bila dibandingkan dengan kabel 1. Hal ini disebabkan karena bagian bawah dari kabel 2 dan kabel 3 tidak terpengaruh oleh kedua kabel lainnya. Nilai temperatur pada akhir bagian kabel 1 nilainya lebih tinggi bila dibandingkan dengan nilai pada kabel 2 dan kabel 3 di bagian awal grafik. Hal ini disebabkan karena letak kabel 1 yang berada di antara kabel 2 dan kabel 3. Kabel 2 dan kabel 3 letaknya berada di pinggir sehingga pengaruhnya lebih kecil.

Pada bagian tengah grafik, yaitu bagian yang menunjukkan konduktor ketiga kabel menunjukkan temperatur yang sama, yaitu 301,14 K.



**Gambar 4.32** Grafik perbandingan temperatur diantara 2 konduktor

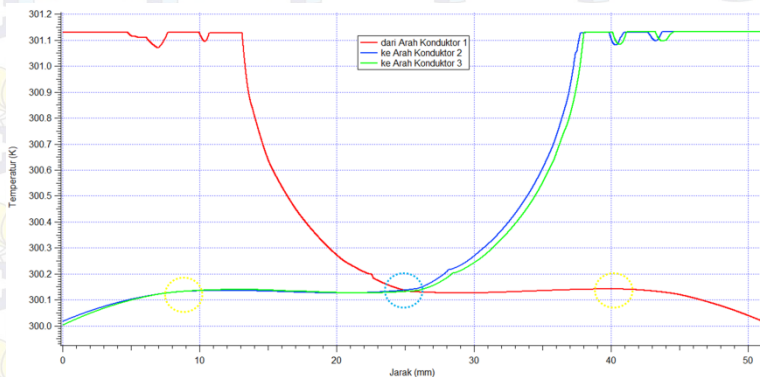


#### 4.6.1.2 Temperatur Diantara Konduktor

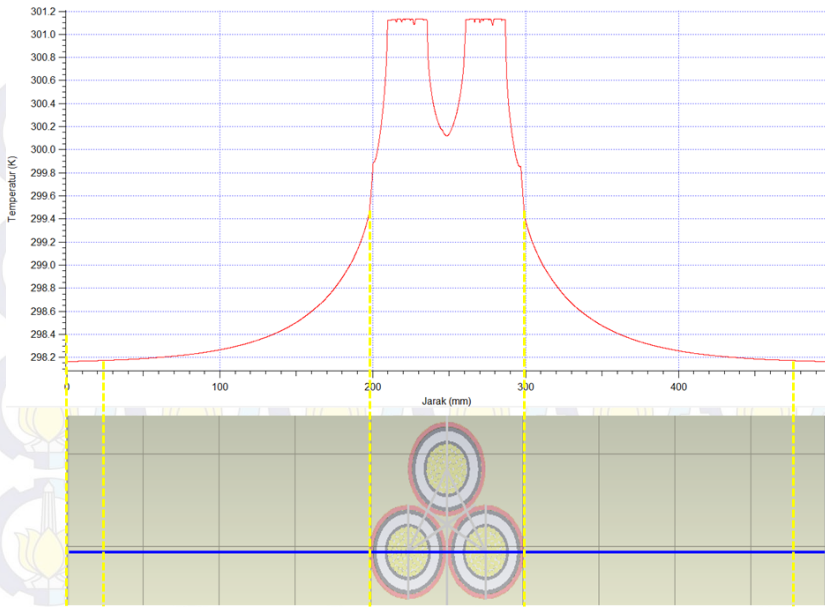
Berdasarkan pengambilan kurva seperti pada gambar 4.9 (b), maka pada gambar 4.32 dapat kita lihat perbandingan temperatur diantara dua kabel. Dapat kita lihat bahwa diantara kedua konduktor terjadi penurunan temperatur yang cenderung sama. Akan tetapi temperatur pada daerah diantara dua buah kabel ini sebenarnya cukup tinggi, yaitu mencapai 300,13 K.

Gambar 4.33 menunjukkan kondisi temperatur pada daerah pengambilan kurva seperti pada gambar 4.9 (c). Kurva ditarik dari tengah masing-masing konduktor kabel sejauh diameter kabel yaitu 51 mm ke daerah diantara dua kabel lainnya. Untuk mengetahui nilai temperatur pada perpotongan ketiga kurva yang ditarik, maka arah penarikan kurva pada kabel 2 dan kabel 3 dilakukan dengan arah sebaliknya dari kabel 1.

Pada gambar 4.33 dapat kita lihat bahwa grafik temperatur pada tiap penarikan kurva menunjukkan karakteristik yang sama. Kemudian dapat kita lihat pula pada lingkaran putus-putus berwarna biru yang menunjukkan titik pertemuan ketiga kurva temperatur pada titik tersebut adalah 300,13 K. Kemudian pada lingkaran putus-putus berwarna kuning yang berada disebelah kanan dapat kita lihat terjadi sedikit kenaikan temperatur. Kenaikan tersebut terjadi ketika garis berada tepat diantara dua buah kabel dimana temperaturnya mencapai 300,15 K.



**Gambar 4.33** Grafik perbandingan temperatur diantara 3 kabel



**Gambar 4.34** Grafik temperatur di sekitar kabel secara horizontal

#### 4.6.1.3 Persebaran Panas Secara Horizontal

Pada subbab ini akan dibahas mengenai kondisi temperatur secara horizontal. Kurva ditarik secara horizontal sejajar dengan dua kabel yang berada di bagian bawah. Alasan pemilihan posisi tersebut diambil karena pada bagian tersebut secara teori temperaturnya secara horizontal akan lebih tinggi dibandingkan pada titik lain. Data temperatur diantara kabel akan digunakan untuk menghitung kemampuan hantaran arus pada kabel bawah tanah.

Pada gambar 4.34 dapat kita lihat secara horizontal bahwa pengaruh temperatur kabel pada tanah di sekitar lebih tinggi bila dibandingkan dengan pemasangan berjajar. Pada pemasangan ini juga dapat kita lihat bahwa temperatur pada tepi urukan tanah sejauh 15 mm tidak terpengaruh oleh temperatur kabel, atau bisa dikatakan tidak terjadi kenaikan temperatur.

#### 4.6.2 Perbandingan Hasil Simulasi Pemasangan *Trefoil* Kering dan *Trefoil* Basah

Pada subbab ini akan dibahas mengenai perbandingan antara dua jenis pemasangan, yaitu pemasangan *trefoil* dalam kondisi kering dan pemasangan *trefoil* dalam kondisi basah. Perbandingan yang akan dilakukan yaitu perbandingan temperatur konduktor dan perbandingan *ampacity* kabel. Karena untuk pemasangan *trefoil* dalam kondisi kering sudah dilakukan pada subbab 4.2.2, maka untuk hasil tidak dijelaskan lagi, dan data dari subbab 4.2.2 diambil sebagai pembandingan pada subbab ini.

##### 4.6.2.1 Perbandingan Temperatur Konduktor

Berdasarkan subbab 4.2.2.1 dan 4.6.1.1 maka dapat kita ambil nilai temperatur konduktor pada pemasangan berjajar dalam kondisi basah dan kering. Temperatur pada konduktor dibutuhkan untuk menghitung *ampacity* pada kabel.

Untuk lebih jelas mengenai temperatur konduktor pada tiap pemasangan dapat kita lihat pada tabel 4.17. Untuk urutan penamaan kabel dapat dilihat pada subbab 4.2.2.1 dan 4.6.1.1.

**Tabel 4.17** Temperatur Konduktor pada Pemasangan *Trefoil*

Penamaan Kabel	Temperatur (K)	
	Kering	Basah
Kabel 1	301,76	301,14
Kabel 2	301,76	301,14
Kabel 3	301,76	301,14

Dari tabel 4.17 dapat kita analisa bahwa temperatur tiap konduktor pada pemasangan berjajar dalam kondisi kering lebih tinggi bila dibandingkan dengan kondisi basah. Hal ini disebabkan karena beberapa air dalam tanah menurunkan temperatur daerah sekitar.

##### 4.6.2.2 Perbandingan *Ampacity* Kabel

Setelah mengetahui temperatur konduktor pada tiap pemasangan maka langkah selanjutnya adalah membandingkan *ampacity* pada tiap pemasangan. Untuk perhitungan *ampacity* didapatkan berdasarkan persamaan dari standar IEC 60287 yang sudah tercantum dalam persamaan (4.7).

Berdasarkan persamaan (4.7) dibutuhkan nilai resistansi termal dan resistansi DC konduktor. Untuk perhitungan resistansi termal didapatkan berdasarkan skema pada gambar 4.14 dan untuk nilai dari resistansi DC konduktor didapatkan dari datasheet kabel, yaitu sebesar  $0.0283 \Omega/\text{km}$  atau  $2.83 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$ .

Untuk menghitung resistansi termal maka dibutuhkan data temperatur tanah disekitar kabel. Jarak yang dipakai untuk mengetahui temperatur tanah dari kabel pada tugas akhir ini adalah 10 mm dari tepi masing-masing *duct* yang dilewati garis penarikan kurva. Karena pada pemasangan berjajar dengan *duct* ini nilai temperatur pada satu sisi dengan sisi lainnya berbeda, maka diambil nilai tengahnya. Untuk lebih jelasnya nilai temperatur dapat dilihat pada tabel 4.18.

**Tabel 4.18** Temperatur tanah di sekitar kabel pada pemasangan *trefoil* dalam kondisi basah

Penamaan Berjajar	Temperatur (K)		
	Bagian Dalam	Bagian Luar	Nilai Rata-rata
Kabel 1	300.15	299,1	299,625
Kabel 2	300.15	299,1	299,625
Kabel 3	300.15	299,1	299,625

Untuk temperatur konduktor pada pemasangan *trefoil* dalam kondisi kering dapat dilihat pada subbab 4.2.2.

Setelah mendapatkan nilai temperatur pada tanah disekitar kabel maka langkah selanjutnya adalah menentukan resistansi termal dari masing-masing kabel. Berdasarkan rumus (4.8) dan dengan nilai  $W$  pada tiap kabel sama, yaitu  $10,737 \text{ W/m}$  serta temperatur diubah kedalam satuan  $^{\circ}\text{C}$  maka didapatkan hasil resistansi termal dari tiap kabel ke tanah seperti pada tabel 4.19.

**Tabel 4.19** Resistansi Termal pada Pemasangan *trefoil*

Penamaan Kabel	Resistansi Termal ( m.K/W)	
	Kering	Basah
Kabel 1	0,192	0,141
Kabel 2	0,192	0,141
Kabel 3	0,192	0,141



Setelah mendapatkan nilai temperatur dari konduktor, tanah sekitar, dan resistansi termal, maka dapat kita hitung *ampacity* kabel. Berdasarkan rumus (4.7) maka didapatkan hasil seperti pada tabel 4.20.

**Tabel 4.20** *Ampacity* pada Pemasangan *trefoil*

Penamaan Kabel	Ampacity (A)	
	Kering	Basah
Kabel 1	615,729	616,174
Kabel 2	615,729	616,174
Kabel 3	615,729	616,174

Dari tabel 4.17 dan 4.20 maka dapat kita analisa beberapa hal, yaitu pada pemasangan *trefoil* dalam kondisi basah, temperatur konduktor lebih rendah bila dibandingkan dengan pemasangan dalam kondisi kering. Nilai temperatur konduktor pada kondisi basah juga lebih rendah, dan pemasangan berjajar dengan kondisi basah memiliki *ampacity* yang lebih baik bila dibandingkan dengan pemasangan dalam kondisi kering. Hal ini disebabkan karena persebaran panas pada pemasangan berjajar dengan kondisi basah tertahan oleh temperatur air, sehingga pengaruhnya terhadap tanah disekitarnya lebih kecil dari pemasangan dalam kondisi kering.

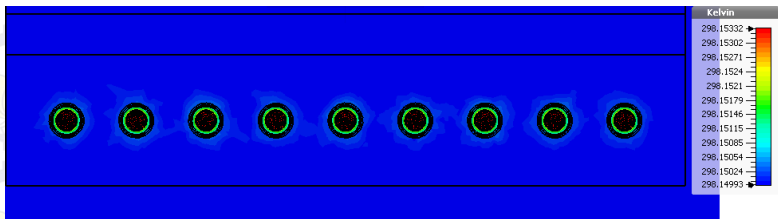
#### **4.7 Perbandingan Temperatur pada Pemasangan Kabel Berjajar dan *Trefoil* dengan Sembilan Kabel**

Pada pembahasan ini akan dilakukan perbandingan temperatur pada pemasangan kabel secara berjajar dan *trefoil* dengan sembilan buah kabel dan dengan sistem yang sama. Temperatur yang dibandingkan adalah temperatur pada kabel dan temperatur pada tanah di sekitarnya. Sebelum membandingkan hasil dari kedua jenis pemasangan, terlebih dahulu dibahas tentang hasil dari masing-masing pemasangan.

##### **4.7.1 Hasil Simulasi pada Pemasangan Berjajar**

Pada simulasi ini kita akan menganalisa kondisi temperatur pada pemasangan kabel secara berjajar. Pada pemasangan ini kondisi pasir pada daerah di sekitar kabel adalah kering.

Hasil simulasi pada pemasangan berjajar dapat kita lihat pada gambar 4.35. Pada gambar 4.35 dapat kita lihat bahwa kenaikan temperatur pada daerah disekitar kabel tidak signifikan. Kenaikan temperatur pada daerah di sekitar kabel bahkan tidak sampai 0,1 Kelvin.



**Gambar 4.35** Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel berjajar

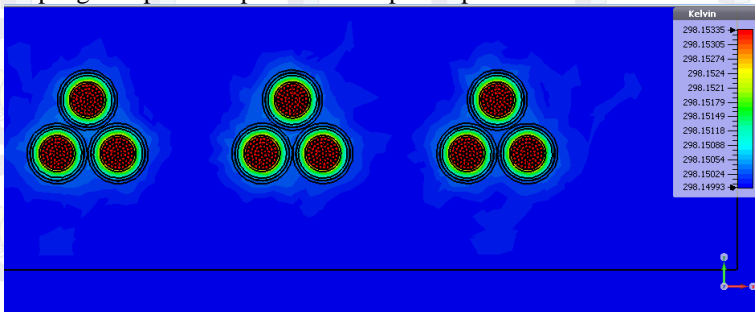
Pada pemasangan ini juga kita dapat lihat bahwa pemasangan ini tidak berpengaruh pada temperatur beton penutup kabel.

Pada pemasangan ini dapat kita lihat bahwa nilai temperatur konduktor pada tiap kabel nilainya sama yaitu 298,15332 K dan temperatur konduktor tidak berpengaruh terhadap temperatur tanah disekitarnya yaitu 298,15 K.

#### 4.7.2 Hasil Simulasi pada Pemasangan *Trefoil*

Pada simulasi ini kita akan menganalisa kondisi temperatur pada pemasangan kabel secara *trefoil*. Pada pemasangan ini kondisi pasir pada daerah di sekitar kabel adalah kering.

Hasil simulasi pada pemasangan berjajar dapat kita lihat pada gambar 4.36. Pada gambar 4.36 dapat kita lihat bahwa kenaikan temperatur pada daerah disekitar kabel tidak signifikan. Kenaikan temperatur pada daerah di sekitar kabel bahkan tidak sampai 0,1 Kelvin. Pada pemasangan ini juga kita dapat lihat bahwa pemasangan ini tidak berpengaruh pada temperatur beton penutup kabel.



**Gambar 4.36** Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel *trefoil*

Pada pemasangan ini dapat kita lihat bahwa nilai temperatur konduktor pada tiap kabel nilainya sama yaitu 298,15335 K dan temperatur konduktor tidak berpengaruh terhadap temperatur tanah disekitarnya yaitu 298,15 K.

#### 4.7.3 Perbandingan Temperatur Konduktor

Berdasarkan subbab 4.7.1 dan 4.7.2 maka dapat kita ambil nilai temperatur konduktor pada pemasangan berjajar dan *trefoil*. Temperatur pada konduktor dibutuhkan untuk menghitung *ampacity* pada kabel.

Untuk lebih jelas mengenai temperatur konduktor pada tiap pemasangan dapat kita lihat pada gambar 4.35 dan 4.36. Karena temperatur konduktor dan tanah pada tiap kabel besarnya sama, maka cukup dilakukan perhitungan terhadap satu kabel saja.

**Tabel 4.21** Temperatur Konduktor pada Tiap Pemasangan

Penamaan Kabel	Temperatur (K)	
	Berjajar	Trefoil
Kabel 1-9	298,15332	298,15335

Dari tabel 4.17 dapat kita analisa bahwa temperatur pada pemasangan *trefoil* nilainya lebih tinggi. Hal ini disebabkan karena tiap konfigurasi mendapatkan pengaruh temperatur dari kabel lain yang letaknya berdekatan.

#### 4.7.4 Perbandingan *Ampacity* Kabel

Setelah mengetahui temperatur konduktor pada tiap pemasangan maka langkah selanjutnya adalah membandingkan *ampacity* pada tiap pemasangan. Untuk perhitungan *ampacity* didapatkan berdasarkan persamaan dari standar IEC 60287 yang sudah tercantum dalam persamaan (4.7).

Berdasarkan persamaan (4.7) dibutuhkan nilai resistansi termal dan resistansi DC konduktor. Untuk perhitungan resistansi termal didapatkan berdasarkan skema pada gambar 4.14 dan untuk nilai dari resistansi DC konduktor didapatkan dari datasheet kabel, yaitu sebesar  $0.0283 \Omega/\text{km}$  atau  $2.83 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$ .

Untuk temperatur konduktor pada pemasangan *trefoil* dalam kondisi kering dapat dilihat pada subbab 4.2.2.

Setelah mendapatkan nilai temperatur pada tanah disekitar kabel maka langkah selanjutnya adalah menentukan resistansi termal

dari masing-masing kabel. Berdasarkan rumus (4.8) dan dengan nilai  $W$  pada tiap kabel sama, yaitu  $10,737 \text{ W/m}$  serta temperatur diubah kedalam satuan  $^{\circ}\text{C}$  maka didapatkan hasil resistansi termal dari tiap kabel ke tanah seperti pada tabel 4.22.

**Tabel 4.22** Resistansi termal pada tiap pemasangan

Penamaan Kabel	Resistansi Termal ( m.K/W)	
	Berjajar	Trefoil
Kabel 1-9	$1,2383 \times 10^{-3}$	$1,2495 \times 10^{-3}$

Setelah mendapatkan nilai temperatur dari konduktor, tanah sekitar, dan resistansi termal, maka dapat kita hitung *ampacity* kabel. Berdasarkan rumus (4.7) maka didapatkan hasil seperti pada tabel 4.23.

**Tabel 4.23** *Ampacity* pada tiap pemasangan

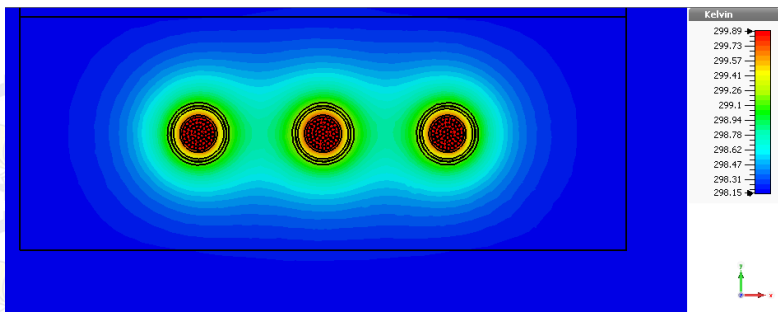
Penamaan Kabel	Ampacity (A)	
	Berjajar	Trefoil
Kabel 1-9	302,286	307,794

Dari tabel 4.23 dapat kita analisa bahwa dengan menurunnya inputan arus pada kabel, maka nilai *ampacity* pada kabel juga mengalami penurunan.

#### 4.8 Perbandingan Temperatur pada Pemasangan Kabel Berjajar dan Trefoil dengan Volume Heat Berbeda.

Pada pembahasan ini akan dilakukan perbandingan temperatur pada pemasangan kabel secara berjajar dan *trefoil* dengan *volume heat* berbeda yaitu sebesar  $10000 \text{ W/m}^3$ . Temperatur yang dibandingkan adalah temperatur pada kabel dan temperatur pada tanah di sekitarnya. Sebelum membandingkan hasil dari kedua jenis pemasangan, terlebih dahulu dibahas tentang hasil dari masing-masing pemasangan.





**Gambar 4.37** Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel berjajar

#### **4.8.1 Hasil Simulasi pada Pemasangan Berjajar**

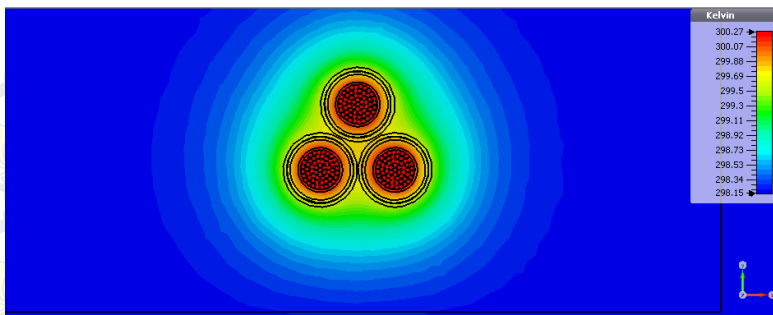
Pada simulasi ini kita akan menganalisa kondisi temperatur pada pemasangan kabel secara berjajar. Pada pemasangan ini kondisi pasir pada daerah di sekitar kabel adalah kering.

Hasil simulasi pada pemasangan berjajar dapat kita lihat pada gambar 4.37. Pada gambar 4.37 dapat kita lihat bahwa kenaikan temperatur pada daerah disekitar kabel tidak terlalu signifikan. Kenaikan temperatur pada daerah di sekitar kabel bahkan tidak sampai keluar dari daerah galian yang ditandai oleh garis hitam. Pada pemasangan ini juga kita dapat lihat bahwa pemasangan ini hanya berpengaruh sangat kecil pada perubahan temperatur yang terjadi pada beton penutup kabel. Pada pemasangan ini juga kita dapat lihat bahwa pemasangan ini tidak berpengaruh pada temperatur beton penutup kabel.

#### **4.8.2 Hasil Simulasi pada Pemasangan *Trefoil***

Pada simulasi ini kita akan menganalisa kondisi temperatur pada pemasangan kabel secara *trefoil*. Pada pemasangan ini kondisi pasir pada daerah di sekitar kabel adalah kering.

Hasil simulasi pada pemasangan berjajar dapat kita lihat pada gambar 4.38. Pada gambar 4.38 dapat kita lihat bahwa kenaikan temperatur pada daerah disekitar kabel tidak signifikan. Kenaikan temperatur pada daerah di sekitar kabel bahkan tidak sampai keluar dari daerah galian yang ditandai oleh garis hitam. Pada pemasangan ini juga kita dapat lihat bahwa pemasangan ini hanya berpengaruh sangat kecil pada perubahan temperatur yang terjadi pada beton penutup kabel.



**Gambar 4.38** Hasil simulasi temperatur pada pemasangan kabel *trefoil*

Pada pemasangan ini dapat kita lihat bahwa nilai temperatur konduktor pada tiap kabel nilainya sama yaitu 300,27 K.

#### 4.8.3 Perbandingan Temperatur Konduktor

Berdasarkan subbab 4.8.1 dan 4.8.2 maka dapat kita ambil nilai temperatur konduktor pada pemasangan berjajar dan pemasangan *trefoil*. Temperatur pada konduktor dibutuhkan untuk menghitung *ampacity* pada kabel.

Untuk lebih jelas mengenai temperatur konduktor pada tiap pemasangan dapat kita lihat pada gambar 4.37 dan 4.38. Untuk urutan penamaan kabel dapat dilihat pada subbab 4.2.1.1 dan 4.2.2.1.

**Tabel 4.24** Temperatur Konduktor pada Tiap Pemasangan

Penamaan Kabel	Temperatur (K)	
	Berjajar	Trefoil
Kabel 1	299,75	300,27
Kabel 2	299,89	300,27
Kabel 3	299,75	300,27

Dari tabel 4.24 dapat kita analisa bahwa temperatur tiap konduktor pada pemasangan *trefoil* lebih tinggi bila dibandingkan dengan pemasangan berjajar. Hal ini disebabkan karena jarak antar kabel yang lebih dekat.

Pada pemasangan berjajar hasilnya cukup menarik, karena temperatur kabel yang berada di tengah, yaitu kabel 2 nilainya lebih tinggi dari dua kabel lainnya. Hal ini disebabkan karena kabel 2 terpengaruh oleh temperatur dua kabel yang menghimpitnya.

Dari hasil ini dapat kita simpulkan bahwa pemasangan berjajar memiliki disipasi panas yang lebih baik, akan tetapi dengan adanya satu kabel yang memiliki temperatur lebih tinggi, maka kabel tersebut akan mengalami *derating* yang lebih besar bila dibandingkan dengan dua kabel lainnya. Sedangkan pada pemasangan *trefoil* karena temperatur pada tiap kabel besarnya sama, maka saat mengalami *derating* besarnya akan cenderung sama.

#### 4.8.4 Perbandingan *Ampacity* Kabel

**Tabel 4.25** Temperatur tanah di sekitar kabel pada pemasangan berjajar

Penamaan Berjajar	Temperatur (K)		
	Sisi Kiri	Sisi Kanan	Nilai Rata-rata
Kabel 1	298,94	299,1	299,02
Kabel 2	299,1	299,1	299,1
Kabel 3	299,1	298,94	299,02

Kemudian untuk temperatur konduktor pada pemasangan *trefoil* juga kita tarik 10 mm pada masing-masing kabel. Untuk pemasangan ini karena jarak ketiga kabelnya yang rapat, maka temperatur diambil 10 mm disisi luar kabel saja. Pada pemasangan ini ternyata temperatur pada tanah disekitar kabel besarnya sama yaitu 299,3 K.

Setelah mendapatkan nilai temperatur pada tanah disekitar kabel maka langkah selanjutnya adalah menentukan resistansi termal dari masing-masing kabel.

Dengan nilai  $W$  pada tiap kabel sama, yaitu 3,54 W/m dan temperatur diubah kedalam satuan  $^{\circ}\text{C}$  maka berdasarkan rumus 4.2 maka didapatkan hasil resistansi termal dari tiap kabel ke tanah seperti pada tabel 4.26.

**Tabel 4.26** Resistansi Termal pada Tiap Pemasangan

Penamaan Kabel	Resistansi Termal ( m.K/W)	
	Berjajar	Trefoil
Kabel 1	0,206	0,274
Kabel 2	0,223	0,274
Kabel 3	0,206	0,274

Setelah mendapatkan nilai temperatur dari konduktor, tanah sekitar, dan resistansi termal, maka dapat kita hitung *ampacity* kabel. Berdasarkan rumus 4.1 maka didapatkan hasil seperti pada tabel 4.27.

**Tabel 4.27** *Ampacity* pada Tiap Pemasangan

Penamaan Kabel	Ampacity (A)	
	Berjajar	Trefoil
Kabel 1	353,862	353,685
Kabel 2	371,468	353,685
Kabel 3	353,862	353,685

Dari tabel 4.4 maka dapat kita analisa beberapa hal, yaitu pada pemasangan *trefoil* akan menghasilkan kemampuan hantar arus atau *ampacity* yang seragam bila dibandingkan dengan pemasangan berjajar, dan *ampacity*-nya lebih kecil bila dibandingkan dengan kabel 1 dan kabel 3 pada pemasangan berjajar.

Pada pemasangan berjajar, *ampacity* pada tiap kabel nilainya berbeda. Kabel 2 memiliki *ampacity* yang paling rendah, hal ini disebabkan karena tingginya temperatur pada kabel akibat dari temperatur dua kabel lain yang menghimpit kabel 2.



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari simulasi pengaruh temperatur terhadap *ampacity* pada kabel bawah tanah adalah sebagai berikut:

1. Kondisi temperatur konduktor pada tiap pemasangan ternyata cukup bervariasi. Pada kondisi tanah kering pemasangan kabel dengan susunan berjajar memiliki nilai temperatur konduktor yang lebih baik dari pemasangan *trefoil*, temperatur kabel tertinggi pada pemasangan berjajar adalah 301,1 K untuk satu kabel yang berada di tengah. Sedangkan untuk pemasangan *trefoil* ketiga kabel memiliki temperatur konduktor yang sama yaitu 301,76 K. Demikian pula pada kondisi tanah basah (kadar air 18%) pemasangan kabel dengan susunan berjajar memiliki nilai temperatur konduktor tertinggi adalah 300,65 K untuk satu kabel yang berada di tengah. Sedangkan untuk pemasangan *trefoil* ketiga kabel memiliki temperatur konduktor yang sama yaitu 301,14 K. Pada pemasangan berjajar dengan duct temperatur konduktor tertinggi adalah 301,22 K untuk kabel yang berada ditengah. Untuk pemasangan *trefoil* dengan duct temperatur tertinggi terdapat di satu kabel yang letaknya diatas yaitu 301,36 K.
2. *Ampacity* pada tiap pemasangan ternyata juga cukup bervariasi, hasilnya adalah sebagai berikut. Pada kondisi tanah kering pemasangan kabel dengan susunan berjajar memiliki *ampacity* yang lebih baik dari pemasangan *trefoil* kecuali untuk kabel yang berada ditengah. *Ampacity* pemasangan berjajar adalah 615,745 A, 615,302 A, dan 616,174 A. Sedangkan untuk pemasangan *trefoil* ketiga kabel memiliki *ampacity* yang sama yaitu 615,729 A. Pada kondisi tanah basah (kadar air 18%) pemasangan kabel dengan susunan *trefoil* memiliki *ampacity* yang lebih baik dari pemasangan berjajar. *Ampacity* kabel dengan pemasangan berjajar berturut-turut dari kiri ke kanan adalah 615,745 A, 615,302 A, dan 616,174. Sedangkan untuk pemasangan *trefoil* ketiga kabel memiliki *ampacity* yang sama yaitu 616,174 A. Pada pemasangan berjajar dengan duct *ampacity* kabel lebih baik daripada pemasangan *trefoil* dengan duct. *Ampacity* kabelnya adalah pada

dua kabel yang berada di sisi pinggir adalah 616,680 A, dan satu kabel yang berada ditengah 615,559 A. Untuk pemasangan *trefoil* dengan duct *ampacity* satu kabel yang letaknya diatas adalah 616,649 A dan dua kabel yang berada dibawah berturut-turut dari kanan ke kiri adalah 615,379 A dan 615,514 A.

3. Berdasarkan data pada poin 1 dan 2, maka dapat kita simpulkan pada kondisi tanah yang basah (kadar air 18%) pada pemasangan berjajar ataupun *trefoil* akan menyebabkan temperatur pada konduktor lebih rendah, dan meningkatnya *ampacity*.
4. Penggunaan Duct pada pemasangan berjajar menyebabkan kenaikan temperatur pada kabel sebesar 0,10 K untuk kabel yang berada dipinggir dan 0,12 K untuk kabel yang berada ditengah. Walaupun demikian *ampacity*-nya ternyata juga mengalami kenaikan. Kenaikan *ampacity* secara berturut-turut dari kabel paling kiri ke kanan adalah 0,935 A, 0,257 A dan 0,506 A.

## 5.2 Saran

Saran untuk studi selanjutnya untuk hasil yang lebih maksimal bisa menggunakan perangkat lunak yang bisa langsung mengetahui nilai *ampacity* kabel dan bisa dilakukan analisis mengenai proses penguapan pada tanah yang basah akibat dari temperatur kabel.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Kahourzade, A.Mahmoudi, B. Nim Taj, and O. Palizban “*Ampacity Calculation of the Underground Power Cables in Voluntary Conditions by Finite Element Method*” The 8th ECTI Association of Thailand – Conference, May, 2011
- [2] L. Yongchun, “*Steady-state Thermal Analysis of Power Cable Systems in Ducts Using Streamline-upwind/Petro-Galerkin Finite Element Method*” IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 19, no. 1, February 2012.
- [3] A.T. William, “*Electrical Power Cable Engineering*” Marcel Dekker, INC. 2005.
- [4] G.J. Anders, M. Coates, and M. Chaaban “*Ampacity Calculations for Cables in Shallow Troughs*” IEEE Trans. Power Delivery, vol. 25, no. 4, October 2010.
- [5] Y. Wang, R. Chen, S. Lin, J. Tian, J. Li, M. Chen, “*Calculation and Analysis of the Current Carrying Capability of Electric Cable Based on Finite Element Method*” IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, October, 2009.
- [6] S. Lin, W. Hu, “*Theoretical Research on Temperature Field of Power Cable Joint with FEM*” International Conference on System Science and Engineering, June, 2012.
- [7] A.K. Naskar, N.K. Bhattacharya, S. Saha, S.N. Kundu “*Thermal Analysis of Underground Power Cables using Two Dimensional Finite Element Method*” IEEE Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, December, 20013
- [8] Roland W. Lewis, P. Nithiarasu, K. N. Seetharamu “*Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*”, John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [9] Francisco de León, “*Calculation of Underground Cable Ampacity*”, CYME International T&D, 2005.
- [10] G.J. Anders “*Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment*”, John Wiley & Sons, Ltd, 2005.





## RIWAYAT HIDUP



**Yosua Pandapotan Sijabat**, lahir di Bekasi, 31 Oktober 1993. Merupakan anak ketiga dari pasangan Saudin Sijabat dan Rosnani Silalahi (†). Mengenyam pendidikan di TK Santo Markus II Jakarta pada tahun 1997-1999, lalu melanjutkan pendidikan di SD Santo Markus II Jakarta pada tahun 1999-2005. Setelah lulus melanjutkan studi di SMP Marsudirini Cawang dari tahun 2005 sampai 2008, kemudian melanjutkan studi ke SMAN 81 Jakarta dari tahun 2008 sampai lulus pada tahun 2011. Setelah lulus SMA penulis melanjutkan studi di Jurusan Teknik Elektro ITS pada tahun 2011 dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga.

Selama kuliah, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro ITS sebagai staff Departemen Lingkar Kampus pada periode 2012/2013 dan sebagai staff ahli Departemen Lingkar kampus pada periode 2013/2014. Dalam dua periode himpunan tersebut penulis juga aktif sebagai IC atau *Instructor Committe*. Penulis mencintai musik, terutama instrumen gitar, sehingga pada beberapa kesempatan penulis bermain musik pada acara-acara di Elektro ITS. Penulis juga aktif sebagai asisten Laboratorium Tegangan Tinggi Elektro ITS, dan menjabat sebagai kordinator praktikum pada tahun ajaran 2015/2016 serta cukup sering terlibat sebagai instruktur dalam beberapa pelatihan.

Penulis dapat dihubungi melalui email :  
[Yosua.sijabat@gmail.com](mailto:Yosua.sijabat@gmail.com)

